

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, MICROESTRUCTURALES Y
RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL ACERO ASTM A53 GRADO B SOMETIDO A
FLUIDOS CORROSIVOS PARA APLICACIONES GEOTÉRMICAS

LAURA CAMILA CASALLAS MORALES

OSCAR SEBASTIÁN ABRIL MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD LIBRE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ

2014

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, MICROESTRUCTURALES Y
RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL ACERO ASTM A53 GRADO B SOMETIDO A
FLUIDOS CORROSIVOS PARA APLICACIONES GEOTÉRMICAS

LAURA CAMILA CASALLAS MORALES

OSCAR SEBASTIÁN ABRIL MARTÍNEZ

TRABAJO DE GRADO

ING. HÉCTOR FERNANDO ROJAS MOLANO

INGENIERO METALÚRGICO

UNIVERSIDAD LIBRE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ

2014

Nota de Aceptación

Jurados

TABLA DE CONTENIDO

1.	TITULO	9
2.	INTRODUCCIÓN	10
3.	ANTECEDENTES	11
4.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
5.	JUSTIFICACIÓN	15
6.	OBJETIVOS	17
6.1	Objetivo General	17
6.2	Objetivos Específicos	17
7.	MARCO TEÓRICO	18
7.1	Energía Geotérmica	18
7.2	Estructura De Los Sistemas Geotérmicos	19
7.3	Plantas De Vapor Seco	20
7.4	Plantas De Separación De Vapor	21
7.5	Plantas De Ciclo Binario	21
7.6	Implicaciones Medio Ambientales	22
7.7	Materiales	23
7.7.1	Generalidades	23
7.7.2	Acero ASTM A53 Grado B.	24
7.8	Corrosión	25
7.8.1	Tipos De Corrosión Según Sus Causas	27
7.8.1.1	Corrosión Electroquímica	27
7.8.1.2	Corrosión Química	29
7.8.1.2.1	Acción De Los Ácidos No Oxidantes	29
7.9	Efecto De Las Variables Ambientales	31
7.10	Efecto De Las Variables Metalúrgicas	32
7.11	Formas De Corrosión	33
7.12	Técnica Pérdida De Masa	34
7.13	Ensayo De Tensión	34
7.14	Microscopia Óptica	36
7.15	Microdureza	36
8	MARCO LEGAL Y NORMATIVO	38
9	MARCO CONCEPTUAL	39
10	DISEÑO METODOLÓGICO	42

10.1	Tipo De Investigación	42
10.2	Método De Investigación	42
10.3	Técnicas Para La Recolección De Información	43
10.4	Diseño Experimental	43
11	MATERIALES Y EQUIPOS	45
11.1	Preparación De Probetas	45
11.2	Identificación De Probetas	45
11.3	Etapas De Limpieza	45
11.4	Inmersión En Estado Líquido	46
11.5	Inmersión En Estado Vapor	46
11.6	Prueba Gravimétrica	48
11.7	Microscopía Óptica Convencional	48
11.8	Microdureza	48
11.9	Ensayo De Tracción	49
12.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
12.1	Tratamiento Térmico Normalizado	50
12.2	Prueba Gravimétrica (Pérdida de Masa)	55
12.3	Ataque de Fluidos En Estado Líquido	54
12.4	Ataque Fluidos En Estado Vapor	56
12.5	Relación de Corrosión	58
12.6	Metalografía	59
12.7	Microdureza	62
12.7.1	Perfil De Dureza Ácido Sulfúrico	63
12.7.1.1	Estado Líquido	63
12.7.1.2	Estado Vapor	65
12.5.2	Perfil De Dureza De Ácido Clorhídrico	67
12.7.2.1	Estado Líquido	67
12.7.2.2	Estado Vapor	69
12.8	Tensión	71
13.	CONCLUSIONES	85
14.	BIBLIOGRAFÍA	86
15.	ANEXOS	88
ANEXO 1	Valores de Microdureza	88
ANEXO 2	Valores ensayo de Tensión	94

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	ESQUEMAS FUENTES TERMALES.....	19
FIGURA 2	PLANTA DE VAPOR SECO.....	20
FIGURA 3	PLANTA DE SEPARACIÓN DE VAPOR.....	21
FIGURA 4	PLANTAS DE CICLO BINARIO.....	22
FIGURA 5	DIAGRAMA HIERRO-CARBONO.....	24
FIGURA 6	MODELO DE CORROSIÓN HÚMEDA EN UN METAL.....	28
FIGURA 7	PARTES EQUIPO DE MICROSCOPIA ÓPTICA.....	36
FIGURA 8	INDENTADOR PARA DUREZA VICKERS.....	37
FIGURA 9	EQUIPO DE LIMPIEZA ULTRASÓNICA.....	45
FIGURA 10	PRUEBA DE INMERSIÓN EN ESTADO LIQUIDO.....	46
FIGURA 11	PRUEBA DE INMERSIÓN EN ESTADO VAPOR.....	47
FIGURA 12	EQUIPO DE MICROSCOPIA ÓPTICA CONVENCIONAL.....	48
FIGURA 13	MICRODURÓMETRO SHIMADZU.....	24
FIGURA 14	TRATAMIENTO TERMICO DE NORMALIZADO.....	50
FIGURA 15	EMPASTILLADORA.....	51
FIGURA 16	CURVA ESFUERZO-DEFORMACION.....	54
FIGURA 17	RELACION DE CORROSIÓN	58
FIGURA 18	METALOGRAFÍA ACIDO SULFÚRICO ESTADO LIQUIDO P.EXTERNA	59
FIGURA 19	METALOGRAFÍA ACIDO SULFÚRICO ESTADO LIQUIDO P.INTERNA	59
FIGURA 20	METALOGRAFÍA ACIDO SULFÚRICO ESTADO VAPOR P.EXTERNA.....	60
FIGURA 21	METALOGRAFÍA ACIDO SULFÚRICO ESTADO VAPOR P.INTERNA	60
FIGURA 22	METALOGRAFÍA ACIDO CLORHÍDRICO ESTADO LIQUIDO P.EXTERNA.....	60
FIGURA 23	METALOGRAFÍA ACIDO CLORHÍDRICO ESTADO LIQUIDO P.INTERNA.....	61
FIGURA 24	METALOGRAFÍA ACIDO CLORHÍDRICO ESTADO VAPOR P. EXTERNA.....	61
FIGURA 25	METALOGRAFÍA ACIDO CLORHÍDRICO ESTADO VAPOR P.INTERNA.....	61
FIGURA 26	SEPARACIÓN DE INDENTACIONES.....	62
FIGURA 27	PERFIL DE DUREZA ACIDO SULFÚRICO LIQUIDO 1.5 HORAS.....	63
FIGURA 28	PERFIL DE DUREZA ACIDO SULFÚRICO LIQUIDO 3 HORAS.....	64
FIGURA 29	PERFIL DE DUREZA ACIDO SULFÚRICO LIQUIDO 4.5 HORAS.....	64
FIGURA 30	PERFIL DE DUREZA ACIDO SULFÚRICO VAPOR 1.5 HORAS.....	65
FIGURA 31	PERFIL DE DUREZA ACIDO SULFÚRICO VAPOR 3 HORAS.....	65
FIGURA 32	PERFIL DE DUREZA ACIDO SULFÚRICO VAPOR 4.5 HORAS.....	66
FIGURA 33	PERFIL DE DUREZA ACIDO CLORHÍDRICO 1.5 HORAS.....	67

FIGURA 34	PERFIL DE DUREZA ACIDO CLORHÍDRICO LIQUIDO 3 HORAS.....	67
FIGURA 35	PERFIL DE DUREZA ACIDO CLORHÍDRICO LIQUIDO 4.5 HORAS.....	68
FIGURA 36	PERFIL DE DUREZA ACIDO CLORHÍDRICO VAPOR 1.5 HORAS.....	69
FIGURA 37	PERFIL DE DUREZA ACIDO CLORHÍDRICO VAPOR 3 HORAS.....	69
FIGURA 38	PERFIL DE DUREZA ACIDO CLORHÍDRICO VAPOR 4.5 HORAS.....	70
FIGURA 39	MONTAJE COMPARADOR DE CARATULA.....	71
FIGURA 40	CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	72
FIGURA 41	CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	73
FIGURA 42	CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	74
FIGURA 43	CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	75
FIGURA 44	CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	76
FIGURA 45	CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	77
FIGURA 46	CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	78
FIGURA 47	CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	79
FIGURA 48	CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	80
FIGURA 49	CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	81
FIGURA 50	CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	82
FIGURA 51	CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	83

LISTA DE TABLAS

TABLA 1	COMPOSICIÓN QUÍMICA ACERO ASTM A53 GR. B.....	4
TABLA 2	PROPIEDADES MECÁNICAS ASTM A53 GR. B.....	25
TABLA 3	DESCRIPCIÓN DE FACTORES DE CONTROL.....	43
TABLA 4	DISTRIBUCIÓN DE FACTORES DE CONTROL.....	44
TABLA 5	COMPARACION MICROESTRUCTURAL.....	51
TABLA 6	ESPECIFICACIONES PROBETA NORMALIZADO.....	54
TABLA 7	PERDIDA DE MASA EN ESTADO LÍQUIDO.....	55
TABLA 8	PERDIDA DE MASA EN ESTADO VAPOR.....	57
TABLA 9	IDENTIFICACION DE INDENTACIONES.....	65
TABLA 10	ESPECIFICACIONES PROBETA.....	72
TABLA 11	ESPECIFICACIONES PROBETA.....	73
TABLA 12	ESPECIFICACIONES PROBETA.....	74
TABLA 13	ESPECIFICACIONES PROBETA.....	75
TABLA 14	ESPECIFICACIONES PROBETA.....	76
TABLA 15	ESPECIFICACIONES PROBETA.....	77
TABLA 16	ESPECIFICACIONES PROBETA.....	78
TABLA 17	ESPECIFICACIONES PROBETA.....	79
TABLA 18	ESPECIFICACIONES PROBETA.....	80
TABLA 19	ESPECIFICACIONES PROBETA.....	81
TABLA 20	ESPECIFICACIONES PROBETA.....	82
TABLA 21	ESPECIFICACIONES PROBETA.....	83

1. TITULO

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, MICROESTRUCTURALES Y RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL ACERO ASTM A53 GRADO B SOMETIDO A FLUIDOS CORROSIVOS PARA APLICACIONES GEOTÉRMICAS.

2. INTRODUCCIÓN

El constante avance en la explotación de recursos naturales indiscriminado realizado por el ser humano; ha generado su temprana escasez y contaminación irreparable, es en este punto donde se inicia la búsqueda de la creación de energías alternativas que favorezcan la solución a estos problemas e idean formas de energías renovables como eólica, solar, biomasa, geotérmica, el desarrollo de celdas de combustibles, entre otras. Colombia inicia con la exploración de una de estas energías llamada energía geotérmica mediante un proyecto liderado por ISAGEM y otras sociedades colaboradoras. Está caracterizada especialmente por la única forma de energía renovable independiente del sol, teniendo como su única fuente de calor presente en el interior de la Tierra.

En el proceso de producción para obtener este tipo de energía es donde se genera el problema principal, debido a la composición química del fluido geotérmico se produce un ambiente altamente corrosivo desde su extracción hasta la planta de generación de energía mediante el uso de tubería de acero ASTM A53 Gr. B, causando altos costos de reparación y mantenimiento de estas líneas de conducción.

De manera que mediante esta investigación se pretende evaluar el comportamiento del acero por medio de la técnica de pérdida de masa y de las propiedades mecánicas de acero ASTM A53 Gr. B antes y después de ser sometido a fluidos característicos de los ambientes altamente corrosivos (al estar expuestos en el proceso de extracción, además de la técnica de microscopia óptica se determina el avance de la corrosión en el material previamente sometido al ataque corrosivo teniendo en cuenta de las variables de tiempo y estado del fluido corrosivo.

3. ANTECEDENTES

Para el desarrollo de este trabajo se consultaron las siguientes investigaciones que guardan relación con el tema en estudio. Estos son:

Helmuth Sarmiento Klapper y su grupo de investigación plantea en sus artículos "*Corrosion Resistance of different Steel grades in the Geothermal Fluid of Molasse Basin*" y "*Evaluation of Suitability of High-Alloyed Materials for Geothermal Applications in the North German Basin*" (2010), realiza un trabajo acerca de los campos geotérmicos presentes en Alemania y el comportamiento de diferentes aceros sometidos a fluidos geotérmicos artificiales similares, comparando el tipo y velocidad de corrosión que estos llegan a presentar. Se utilizan aceros inoxidables austenítico 316L ampliamente utilizado en la industrias químicas por tener una elevada resistencia a la corrosión y la aleación de acero inoxidable dúplex 2205, el cual posee una resistencia a la fluencia que duplica la del acero inoxidable austenítico convencional (18Cr-8Ni) y una gran resistencia a la corrosión por picaduras y bajo tensión, principalmente en ambientes con cloruros. (*1) De igual manera toma como referencia los aceros al carbono de grado API L80 debido a su capacidad de para combatir CO₂, corrosión y H₂S y agrietamiento del medio ambiente sin tratamiento del inhibidor. (*2) y API Q125 ampliamente usado en el transporte de gas y petróleo en las industrias petroleras (*3). Teniendo como resultado, en la construcción de una central geotérmica un mejor comportamiento frente a la corrosión; el acero inoxidable que podría ser utilizado en las instalaciones por encima del suelo y los aceros al carbono ya mencionados en la construcción de tuberías de perforación, de igual manera se identificó el comportamiento de los aceros al carbón en exposiciones entre 100° y 150° comportamientos estables y al aumento de esta temperatura no se obtuvo algún cambio en sus propiedades demostrando así su excelente resistencia a la corrosión uniforme y susceptibilidad despreciable a la corrosión localizada. En cuanto a los aceros inoxidables se observó su notable resistencia a la corrosión uniforme prevista una excelente resistencia a la corrosión por picaduras y en hendiduras apropiadas para las tuberías de línea en la central geotérmica.

Keith A Litchi en su trabajo "*geothermal corrosión and corrosión products*" muestra el proceso que llevo para caracterizar cierto tipos de acero al carbono; en este caso el SAE 1018 utilizado principalmente para piezas no críticas que no estén expuestas a altos esfuerzos de puentes, construcciones y edificios (*4) y el acero y al aleación 4140 HT utilizada a menudo en la fabricación de los titulares de perforación, abrazaderas, medidores, plantillas, moldes y matrices (*5), variando tiempos y temperaturas de exposición en fluidos geotérmicos extraídos de pozos en Nueva Zelanda, comparando los resultados entre ellos, con respecto a la velocidad de corrosión y la profundidad obtenida para cada uno de estos. Caracterizando cada uno de estos aceros debido al comportamiento presentado después de la exposición. El resultado que arroja esta investigación de acero al carbono y acero de baja aleación 4140 fue que exhibieron bajas tasas anuales de corrosión en el fluido geotérmico diámetro y vapor. Exhibieron películas de producto que consiste principalmente en el hierro sulfuros, mackinawite, Troilita y

pirrotita, se formaron estas y su crecimiento se relacionó directamente con la tasa de corrosión.

Mario A. Vega León en “*estudio catódico de cinética de corrosión del acero al carbón en fluido geotérmico mediante un electrodo de disco rotatorio*” (2006), presento un estudio acerca del acero ASTM A-36 en fluido geotérmico; es el tipo más común de aleación de acero. Se usa para la mayoría de componentes de la construcción, incluyendo columnas, vigas, plataformas y elementos de acabado. (*6) El procedimiento se llevó a cabo utilizando un electrodo de disco rotatorio a diferentes velocidades de giro, con el objetivo de caracterizar su mecanismo cinético. Encontró como resultado que la velocidad de corrosión se ve incrementada por el flujo del electrolito, acelerando la reacción catódica en él.

Carlos A. Miranda Herrera, Ismael Canchola Félix, Joaquín Raygoza Flores y Othón Mora Pérez “*Corrosión en tuberías de línea y de revestimiento de pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC*”(2009), presenta la investigación acerca de pozos geotérmicos en México los cuales en los últimos años han presentado desgastes en sus tuberías de revestimiento y en las tuberías de línea (tuberías tipo API L-80 y ASTM A-53 grado B) por el carácter ácido de los fluidos de estos pozos, dando como reparación acortar su profundidad para así explotar diferentes estratos productivos y solo utilizar los más superficiales. El acero API L80 al ser una tubería de revestimiento está en contacto con una mezcla agua-vapor de fluido geotérmico, lo que aumenta las condiciones de agresividad debido a los contenidos de gases incondensables, esta tubería es susceptible al ataque por H₂S y CO₂ y el acero ASTM A-53 grado B es un material económico y adecuado para las tuberías sujetas a presión con fluidos geotérmicos, debido a su inmunidad al ataque del H₂S en ausencia de oxígeno; sin embargo, hay oxígeno presente en combinación con otros elementos, como el CO₂. la inmunidad de la tubería se deriva de una película auto protectora de sulfuro de hierro, producto de corrosión, que rápidamente recubre las paredes internas y que es producida por la acción del H₂S sobre el acero común a temperaturas superiores a 30° C(*7) determino que estas tienden a endurecerse y a perder material por corrosión a medida que son expuestas al fluido por corrosión dulce producida por el contacto con el CO₂ del fluido, así mismo determino la susceptibilidad al ataque de H₂S en la medida que endurecieron el material pero no al termino de generar grietas significativas y determino que la diferencia entre pozo y pozo no fue mucha; pero que hubo una mayor velocidad de corrosión en el acero tipo ASTM A-53 grado B en condiciones carentes de oxígeno, por lo que la corrosión no es producto de un ataque por oxígeno.

G. Tres, E.A. Saborío, L.R. Ajún, A. Arias, A. Rodríguez, O. Bravo, J.M. Malo en “*Online Monitoring of Corrosion in a Liquid-Steam Line Pipe of the Miravalles Geothermal Field*”(2007), evaluó la corrosión interna en una tubería de líquido-vapor de tipo A515 acero de bajo carbono del campo geotérmico de Miravalles (CGM) en Costa Rica. Realizado por controles como: Resistencia de Polarización Lineal (LPR), la resistencia eléctrica (ER), y pérdida de peso. Demostrando que el desgaste, en tuberías con fluido bifásico, se produce de manera homogénea, por lo cual se pueden utilizar los datos para

definir las especificaciones de sobre espesor por corrosión.

G. Tres, E.A. Saborío, L.R. Ajún, A. Arias, A. Rodríguez, O. Bravo, J.M. Malo en *“Online Monitoring of Corrosion in a Liquid-Steam Line Pipe of the Miravalles Geothermal Field”* (2008), Plantea un estudio acerca del desgaste interno. De tuberías de diferentes aceros al carbono, tales como: ASTM A515, ASTM A53, ASTM A234, ASTM A36 y API 5L., en donde sus funciones principales son evitar la transferencia de calor al medio y proteger al metal base de agentes corrosivos atmosféricos, utilizados tanto en fluidos bifásicos como en fluidos líquidos. Como resultado se encontró que el desgaste, en tuberías con fluido bifásico, se produce de manera homogénea, por lo cual se pueden utilizar los datos para definir las especificaciones de sobre espesor por corrosión.

I. Saucedo, C.A. Miranda, G. Cine, O. Susarrey, A. Corona, en su artículo *“Análisis de tuberías de acero A-35 gr. B expuesto a fluidos geotérmicos”* (2011) propuesto en su trabajo la problemática de la red de tuberías geotérmicas de la central de Cerro Prieto, realizando un análisis del comportamiento de la tubería expuesta. Registrando disminución en el material al ser expuestos en el medio corrosivo y de manera inversa el aumento de la dureza del material. Obtuvieron como resultado aproximaciones de la vida remanente de las tuberías en operación, a su vez las curvas de fatiga del material A-53 gr. B, antes y después de ser expuestos al medio expuestos a una carga de 2600N y el tiempo de exposición de 30 días en el medio, caracterizando las fracturas del material de antes y después de someterlo al medio de una fractura dúctil a una posteriormente frágil.

H. Sarmiento Klapper, R. Bäßler, A. Burkert, A. Saadat, M. Finke presentan en el artículo *“Evaluación de la resistencia a la corrosión de materiales para su uso en centrales geotérmicas”* (2010), pruebas a los aceros de baja aleación API L80 y API Q125, los aceros inoxidables aleación 24 y aleación 31, así como también de las aleaciones base níquel: aleación 50 y aleación B-10, y base titanio Ti Grado 12 y Timetal 6-2-4-6 en un fluido sintético con condiciones similares a las de un pozo, montados sobre una configuración especial con el objetivo de evaluar la susceptibilidad a la corrosión por medio de rendijas y a la corrosión bajo esfuerzos. Obtuvieron como resultado en los aceros API L80 y API Q125 corrosión localizada, no son aptos para aplicaciones de construcción. Los aceros inoxidables aleación 24 y aleación 31 aunque tienen buenas propiedades de resistencia la corrosión presentaron cierta susceptibilidad a la corrosión en rendijas limitando esta aplicación en la construcción y por último las aleaciones base níquel: aleación 50 y aleación B-10, así como las aleaciones base titanio Ti Grado 12 y Timetal 6-2-4-6 presentaron excelente comportamiento a los fenómenos de corrosión localizada de manera que estos fueron los más recomendables en las aplicaciones de construcción para estas centrales geotérmicas.

4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las principales fuentes de energía eléctrica en Colombia actualmente son las hidroeléctricas, termoeléctricas y generación por uso de combustibles fósiles, sin embargo, es necesaria la exploración de energías alternativas renovables, ampliando y garantizando el suministro de energía, contribuyendo a la disminución de gases de efecto invernadero y el cambio climático. Debido a que Colombia hace parte del cinturón de fuego del pacífico se presentan temperaturas altas en el subsuelo por una actividad volcánica constante, por ello el desarrollo del recurso geotérmico puede darse en el país

La producción de energía geotérmica se realiza a partir de la extracción de fluidos geotérmicos formándose debido al agua lluvia que se filtra hacia el interior de la tierra formando un posible yacimientos, constituyendo su comportamiento ácido debido a la mezcla con minerales y sales contenidas en la composición de la corteza de la tierra y de su localización cerca de actividad volcánica; debido al calor interno de la tierra la ascensión de este fluido es en estado de vapor conducido a la central eléctrica por medio de tuberías y condensado para nuevamente ser transportado hacia el yacimiento después de su aprovechamiento energético, brindando una energía limpia y renovable.

El uso de tuberías requeridas para la extracción de fluidos geotérmicos se encuentra sometidas a esfuerzos por diferenciales de temperatura, operación y corrosión, causando que este tipo de fenómeno corrosión/esfuerzos, reduzca su resistencia a la fatiga y está íntimamente relacionado al tipo de picadura inducida por el medio ambiente en el cual se encuentra esforzado.

La tubería utilizada para el transporte del fluido desde el yacimiento hasta la central eléctrica es acero ASTM A - 53 gr B. que al ser sometido al fluido corrosivo, produce corrosión dulce, generando un adelgazamiento del metal y formación de hojuelas, por lo tanto se vuelve susceptible a la fractura, debido a esfuerzos por corrosión producidos por la inclusión de hidrogeno que vuelve quebradizo al acero.

5. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En la búsqueda de energías alternativas que sustituyan los combustibles fósiles, se inició con la investigación de recursos naturales aun no explorados^[1]; una de estas alternativas comenzó con la explotación del vapor presente debajo de la corteza terrestre llamada energía geotérmica. Este tipo de energía utilizada para la generación de electricidad requiere del transporte de estos fluidos desde el yacimiento hasta la central eléctrica por medio del uso de tuberías; debido a que estas se encuentran sometidas a fuertes condiciones de trabajo se producen dos problemas principales, uno es la incrustación por inducción de hidrogeno y otro la corrosión, el segundo de carácter más agresivo^[2].

Debido a la posición geográfica con que cuenta el país, existe una intensa actividad sísmica y volcánica favoreciendo la producción de energía geotérmica aun no desarrollada, se han realizado estudios y exploraciones que contribuyen a la identificación del recurso y su caracterización preliminar, hechos por empresas como la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), Geo energía Andina (GESA) y entidades como la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), el instituto de Planificación y promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No interconectadas (IPSE), el Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) del Ministerio de Minas y Energía (MME). En la actualidad se está planteando un proyecto para la explotación de este recurso en zonas con un potencial geotérmico alto en cercanías del Volcán Nevado del Ruiz, denominado Proyecto Geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz, ejecutado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), Universidad Nacional de Colombia – Departamento de Geo ciencias (UNAL), el Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS), Centro Internacional de Física (CIF) – Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y Banco Interamericano de Desarrollo BID^[3].

El acero ASTM A53 GRADO B es el material utilizado en las tuberías de conducción para la producción de energía geotérmica, debido a que este es un material económico y adecuado para la presión que trabaja el fluido geotérmico, además cuenta con una inmunidad al ataque del H_2S en ausencia de oxígeno; sin embargo, hay oxígeno presente en combinación con otros elementos, como el CO_2 . La inmunidad de la tubería se deriva de una película auto protectora de sulfuro de hierro, producto de la corrosión, que rápidamente recubre las paredes internas y que es producida por la acción del H_2S sobre el acero común a temperaturas superiores a $30^{\circ}C$ (a temperatura inferior el material se vuelve vulnerable). El fenómeno de la corrosión en estos casos, ocurre cuando entra en solución CO_2 y H_2S con el agua condensada que hay en las paredes de las tuberías, esto solo ocurre en aquellas que no están expuestas a concentraciones altas de sílice incrustado ya que este es un desoxidante e impide el proceso de corrosión^[4].

El fluido geotérmico derivado de los pozos poseen características que presentan un comportamiento altamente corrosivo, como lo indican los estudios realizados por los proyectos tomados como referencia, debido a esto y lo inasequible que es adquirir un fluido geotérmico directamente sustraído de un pozo en nuestro país porque no existe una central de este tipo, se requiere de la simulación de fluidos altamente corrosivos que se encuentran en las características químicas del fluido geotérmico, información que brinda las investigaciones consultadas realizadas en diferentes plantas de energía geotérmica en distintos países, por ello se utiliza ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido clorhídrico (HCl) al ser los gases con comportamiento altamente corrosivo presentes en los fluidos geotérmicos estudiados por las investigaciones^[5], además los Laboratorios de Química de la Universidad Libre ofrecen una factible obtención; dichos fluidos se extraen en estado líquido y vapor directamente del pozo geotérmico, para simular esta situación los fluidos simulados serán expuestos para evaluar el comportamiento del acero ASTM A-53 Gr. B sometido a ambientes en estado líquido y vapor.

Actualmente se encuentra en la fase de exploración del recurso, por lo tanto esta investigación está destinada a generar conocimiento acerca del posible comportamiento de las tuberías de conducción utilizadas en la producción de energía geotérmica^[3]

6. OBJETIVOS

6.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades mecánicas, microestructurales y resistencia a la corrosión del acero **ASTM A53 GRADO B** sometido a fluidos corrosivos para aplicaciones geotérmicas.

6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades mecánicas del acero **ASTM A53 GRADO B**, mediante los ensayos de tensión y dureza, antes y después de someterlo a fluidos corrosivos.
- Establecer los cambios microestructurales del acero **ASTM A53 GRADO B** mediante microscopia óptica convencional, antes y después de someterlo a fluidos corrosivos.
- Analizar la resistencia a la corrosión del acero **ASTM A53 GRADO B** sometido a fluidos corrosivos, mediante la técnica de pérdida de masa.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. ENERGÍA GEOTÉRMICA^[6]

En general, la palabra geotermia se refiere al calor natural existente en el interior de la Tierra. Este calor tiene dos fuentes: el colapso gravitatorio que formó la Tierra y el decaimiento radioactivo de varios isótopos en la corteza terrestre. La baja conductividad térmica de la corteza rocosa determina un tiempo de enfriamiento de miles de millones de años. En la práctica se denomina geotermia al estudio y utilización de la energía térmica que, transportada a través de la roca y/o fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma, dando origen a los sistemas geotérmicos (OLADE/BID, 1994).

Aun y cuando la geotermia ha existido siempre, no fue sino hasta principios del siglo XX que empezó a utilizarse de forma comercial, haciéndose notoria su existencia hace apenas tres décadas, y con el incremento en el costo de los combustibles fósiles en la década de los setenta se le dio una importancia relevante, contribuyendo en parte a solucionar los requerimientos de energía de algunos países. Actualmente, la energía geotérmica no se considera como una esperanza para el futuro, más bien se le considera un recurso explotable económica y técnicamente, limpio, flexible, confiable y abundante, con una gran variedad de aplicaciones, entre las que se encuentran: generar electricidad, enfriar o calentar espacios habitables, producir diversas materias primas, balneología y turismo, invernaderos (agricultura, floricultura e hidroponía), criaderos de peces y mariscos, y procesos industriales y de manufactura (secado, concentración de soluciones, etc.).

La geotermia que se explota actualmente para generar electricidad, proviene del calor transportado por agua subterránea de alta temperatura. Ésta ha sido calentada por intrusiones magmáticas, relacionadas con zonas de contacto entre placas tectónicas. En estos lugares privilegiados, el gradiente geotérmico llega a ser varias veces mayor que el normal, cuyo promedio es de 33°C/km. Por ello, en estas zonas es posible encontrar agua a temperaturas de entre 200°C y 400°C, a profundidades de hasta 3 km, lo que permite la perforación económica de pozos productores de fluido de alta entalpía, el cual es apropiado para la generación de electricidad a través de turbinas.

La energía geotérmica es una energía renovable que aprovecha el calor del subsuelo para climatizar y obtener agua caliente sanitaria de forma ecológica. Ese calor contenido en el subsuelo es empleado mediante el uso de Bombas de Calor Geotérmicas para caldear en invierno, refrigerar en verano y suministrar agua caliente sanitaria. Por tanto, cede o extrae calor de la tierra, según queramos obtener refrigeración o calefacción, a través de un conjunto de colectores (paneles) enterrados en el subsuelo por los que circula una solución de agua con glicol. Las aplicaciones de la geotermia dependen de las características de cada fuente. Los recursos geotérmicos de alta temperatura (superiores a los 100-150°C) se aprovechan principalmente para la producción de electricidad.

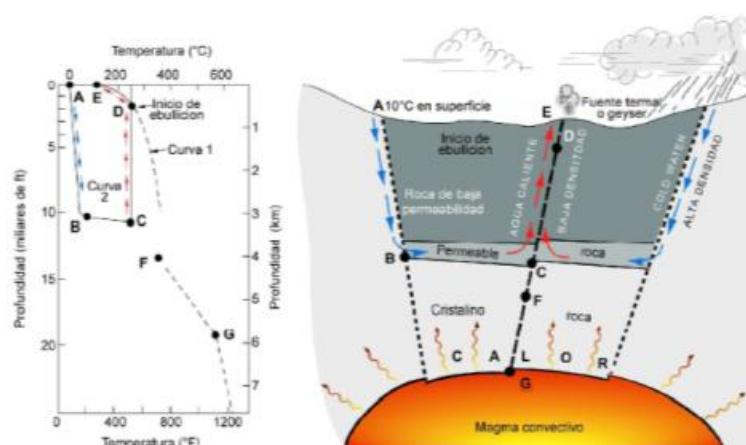
Cuando la temperatura del yacimiento no es suficiente para producir energía eléctrica, sus principales aplicaciones son térmicas en los sectores industrial, servicios y residencial. Así, en el caso de temperaturas por debajo del 100°C puede hacerse un aprovechamiento directo o a través de bomba de calor geotérmica (calefacción y refrigeración). Por último, cuando se trata de recursos de temperaturas muy bajas (por debajo de los 25°C), las posibilidades de uso están en la climatización y obtención de agua caliente ^[7].

7.2. ESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS GEOTÉRMICOS^[8]

Los antecedentes aportados por las investigaciones geológicas, geofísicas y geoquímicas de una gran cantidad de sistemas geotérmicos permiten construir un modelo básico de la estructura de estos sistemas. Aun cuando cada sistema difiera en cierta medida de los otros, su ocurrencia está condicionada por los siguientes factores básicos:

- **Fuente de Calor:** Corresponde generalmente a un cuerpo de magma a unos 600-900°C
Emplazado a menos de 10 km de profundidad, desde el cual se trasmite el calor a las rocas circundantes.
- **Recarga de agua:** El agua meteórica o superficial debe tener la posibilidad de infiltrarse en el subsuelo, a través de fracturas o rocas permeables, hasta alcanzar la profundidad necesaria para ser calentada.
- **Reservorio:** Es el volumen de rocas permeables a una profundidad accesible mediante perforaciones, donde se almacena el agua caliente o el vapor, que son los medios para utilizar el calor.
- **Cubierta impermeable:** Impiden el escape de los fluidos hacia el exterior del sistema, usualmente corresponde a rocas arcillosas o a la precipitación de sales de las mismas fuentes termales.

Figura 1. Esquema fuentes termales



Fuente: N. Dixon "Que es la Energía Geotérmica" Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa Italia

De acuerdo, principalmente con la recarga del agua y su cantidad en el lugar, estos pueden ser clasificados como:

- Sistemas de agua caliente: Cuyos reservorios contienen agua a temperaturas entre 30 y 100°C, utilizados principalmente en la agricultura y la calefacción.
- Sistemas de agua - vapor llamado también de vapor húmedo, contienen agua bajo presión a temperaturas superiores a 100°C. En los cuales se realiza actualmente la mayor explotación de recursos.
- Sistemas de vapor seco o de vapor dominante, producen vapor sobrecalentado.
- Sistemas de rocas secas calientes: Corresponden a zonas de alto flujo calórico, en el que no fluyen fluidos que transportan calor.

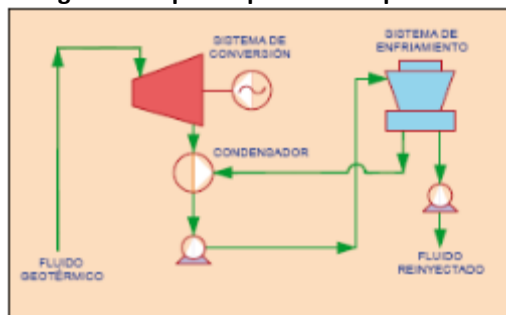
Existen varios tipos de procesos de conversión de energía para generar electricidad por medio de recursos hidrotermales. Actualmente, tres de estos procesos se encuentran en operación comercial: vapor seco, sistemas de separación de vapor y ciclo binario.

7.3. PLANTAS DE VAPOR SECO^[9]

Las plantas de vapor seco se utilizan para producir energía de yacimientos de vapor dominante. En este caso, el vapor saturado o ligeramente sobrecalentado que se obtiene en la superficie se envía directamente a las turbinas (Fig. 2). El vapor húmedo se condensa a la salida, para regresarse al yacimiento a través de pozos de inyección. Es una tecnología bien desarrollada y comercialmente disponible, con tamaños de turbina típicos en el rango de 35 MWe a 120 MWe.

Los sistemas de vapor dominante han sido explotados únicamente en Indonesia, Italia, Japón y Estados Unidos. La mitad de la capacidad de generación instalada se encuentra en estos campos. Los campos de líquido dominante son mucho más comunes.

Figura 2. Esquema planta de vapor seco

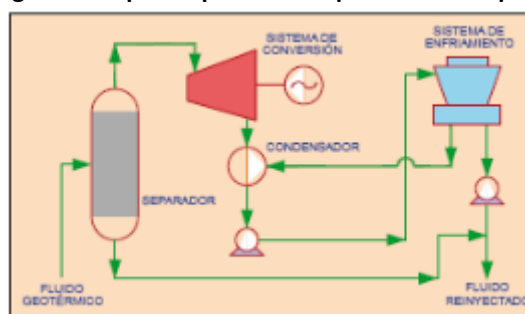


Fuente: V. Arellano, E. Iglesias, A. García. "La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura"

7.4. PLANTAS DE SEPARACIÓN DE VAPOR^[9]

En yacimientos geotérmicos dominados por líquido, los pozos generalmente producen una mezcla de agua y vapor en la superficie, esto se debe a que el fluido del yacimiento sufre un proceso de ebullición en el interior del pozo, causado por la caída de presión a lo largo de la tubería. Cuando la mezcla llega a la superficie, el vapor y el líquido se separan por medio de instalaciones adecuadas. El primero es utilizado para alimentar la turbina, mientras que el líquido se inyecta nuevamente al yacimiento (Fig. 3). Las plantas de separación de vapor se utilizan para producir electricidad de los sistemas de líquido dominante, que están lo suficientemente calientes como para permitir la ebullición de una porción importante de líquido en la superficie. Secuenta con tamaños de turbina típicos en el rango de 10 MWe a 55 MWe.

Figura 3. Esquema planta de separación de vapor



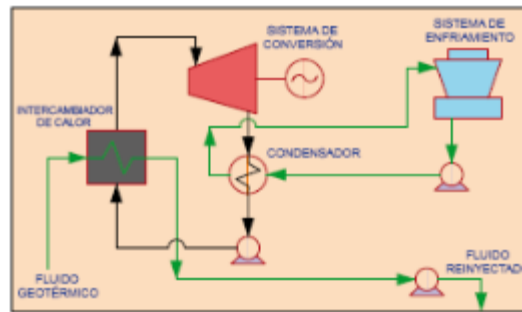
Fuente: V. Arellano, E. Iglesias, A. García. “La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura”

7.5. PLANTAS DE CICLO BINARIO^[9]

Las plantas de ciclo binario son apropiadas para la explotación de los sistemas geotérmicos de líquido dominante, que no están lo suficientemente calientes como para producir una importante ebullición del fluido geotérmico, y para utilizar el calor contenido en los fluidos de desecho de las plantas de separación de vapor.

En estas plantas el calor que se obtiene del fluido geotérmico se transmite por medio de un intercambiador de calor, a un fluido de trabajo secundario con un menor punto de ebullición (por lo general es un refrigerante). El fluido de trabajo se expande en una turbina, se condensa y se recalienta en otro ciclo (Fig. 4). Existen unidades de 1 MWe a 25 MWe y actualmente hay en el mundo una capacidad instalada de aproximadamente 300 MWe, en este tipo de plantas.

Figura 4. Esquema planta de ciclo binario



Fuente: V. Arellano, E. Iglesias, A. García. "La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura"

El proceso de extracción de este recurso generalmente se realiza por acción de turbinas de vapor convencionales y plantas de ciclo binario; donde las turbinas de vapor convencionales requieren fluidos a temperaturas de 150°C; con descarga atmosférica, adicionalmente pueden tener unidades de condensación como uso adicional a este, aumentando así el consumo de vapor.

7.6. IMPLICACIONES MEDIO AMBIENTALES^[10]

Algunas implicaciones medioambientales que presenta este tipo de energía en su extracción pueden ser: el ruido producido en la perforación al dejar salir algo de vapor libremente en el momento de la extracción, la sismicidad del terreno; también juega un papel importante debido a que en los campos de vapor seco la presión de almacenamiento es baja debido a caídas de presión altas y en ocasiones muy raras explosiones debido a la falta de inyección; la sismicidad influye debido a que la mayoría de estos sitios geotérmicamente activos se encuentran en zonas muy propensas a terremotos, debido a esto se ha adoptado la inyección de fluido que lubrica las fracturas y aumenta las presiones, creando así pequeños terremotos también denominado micro sismicidad, especialmente cuando la reinyección no se realiza a la misma profundidad en que se produce el acuífero pero en casos en la que la reinyección se diseña para mantener las presiones la sismicidad no aumenta notablemente.

Una variable importante que se presenta en este proceso son los contaminantes que se producen, expulsados en forma de gases no condensables; como lo son: dióxido de carbono (CO₂), bajas cantidades de ácido sulfhídrico (SH₂), dióxido de azufre (SO₂), Hidrogeno (H₂), Metano (CH₄) y Nitrógeno (N₂). También hay disolución de sílice en el agua producida junto con metales pesados, cloruros sódico y potásico y en ocasiones carbonatos; dependiendo de la interacción del agua y la roca en las profundidades. Su mal olor característico debido al SH₂ han sido catalizados en lo posible para disminuir así el impacto generado al ambiente.

En condiciones que favorezcan la utilización de energía geotérmica las siguientes observaciones serían muy útiles para una idea cuantitativa acerca de esta y sumar así la energía geotérmica como otro tipo de energía renovable.

7.7. MATERIALES^[11]

7.7.1. GENERALIDADES

Se denomina acero a las aleaciones de hierro (Fe) y Carbono (C) en donde esta no supera el 5%, de igual manera se encuentra otros minerales en diferente disposición como Azufre (S), fósforo (P) y nitrógeno (N). Además de elementos contenidos en aceros aleados como Manganeso (Mn), Silicio (Si), Cromo (Cr) y Molibdeno (Mo), se considera una aleación de hierro, acero si presenta en su composición química menos de un 2% de Carbono.

Los metales y sus aleaciones, incluyendo acero, aluminio, magnesio, zinc, hierro fundido, titanio, cobre y níquel, generalmente tienen como característica una buena conductividad eléctrica y térmica, una resistencia relativamente alta, una alta rigidez, ductibilidad o conformabilidad y resistencia al impacto. Son particularmente útiles en aplicaciones estructurales o de carga. Aunque en ocasiones se utilizan metales puros. Las combinaciones de metales conocidas como aleaciones proporcionan mejoría en alguna propiedad particularmente deseable permiten una mejor combinación de propiedades.

Una de las clasificaciones de los aceros corresponde a la relación del contenido de carbono comprendido de la siguiente manera:

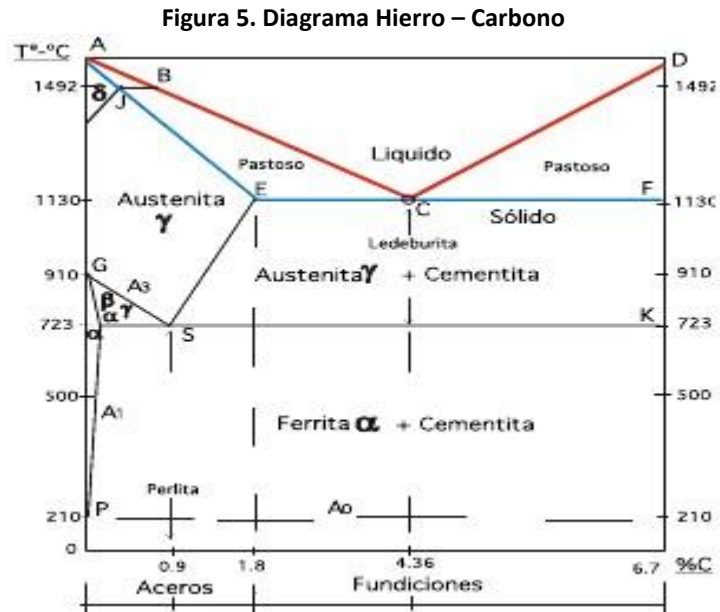
- Acero no aleado, donde el contenido es menor al 2%.
- Acero de baja aleación, en el cual el contenido de carbono es superior al 0,2% y otra cantidad de elementos aleantes no superior al 5%.
- Acero de alta aleación, contiene una cantidad de elementos aleantes superior al 5%.

En el diagrama de equilibrio o de fases, Fe-C se representa las transformaciones que sufren los aceros al carbono con la temperatura, admitiendo que el calentamiento (o enfriamiento) de la mezcla se realiza muy lentamente de modo que los procesos de difusión (homogeneización) tienen tiempo para completarse.

El acero puede tener las siguientes fases de equilibrio:

1. Ferrita (α): Consiste en átomos de hierro con estructura cristalina BCC y átomos de carbono en los sitios intersticiales. La cantidad de átomos de carbono presentes en la ferrita es pequeña. La ferrita es una fase muy suave, dúctil y magnética.
2. Austenita (γ): Consiste en átomos de hierro con estructura FCC y átomos de carbono en los sitios intersticiales. Presenta menor suavidad y ductilidad que la ferrita. Es una fase no magnética.
3. Cementita (Fe_3C). También se llama Carburo de Hierro. Es un compuesto intermetálico. Es una fase muy dura y frágil.

4. Perlita. Es una fase que resulta de la reacción eutectoide del acero. La reacción eutectoide permite que la austenita en estado sólido se transforme en ferrita y cementita, ambas en estado sólido. Esta transformación es similar a la reacción eutectica, por lo que la fase resultante tiene una apariencia similar al solido eutéctico



7.7.2. Acero ASTM A53 Grado B

Acero al carbón en este caso en forma de tubería, destinada a aplicaciones de tipo mecánico y de alta presión. Empleado también en usos ordinarios como la conducción de vapor, agua, gas, y las líneas de aire.

La composición química de la tubería de acero ASTM A-53 Gr. B sin costura (Tipo S) a utilizar son las siguientes:

Tabla 1. Composición química Acero ASTM A53 Gr. B

Composición, Max, %									
	Carbono	Manganeso	Fosforo	Azufre	Cobre ^A	Níquel ^A	Cromo ^A	Molibdeno ^A	Vanadio ^A
Grado B									
	0.30	1.20	0.05	0.045	0.40	0.40	0.40	0.15	0.08

^A La combinación de estos cinco elementos no puede exceder 1,00%

Fuente: ASME/ASTM A53

Y sus propiedades mecánicas son:

Tabla 2. Propiedades Mecánicas Acero ASTM A53 Gr. B

	TIPO S
	GRADO B
Resistencia a la Tracción, Min, Psi [Mpa]	60 000 [415]
Limite elástico, Min, Psi [Mpa]	35 000 [240]
Elongación (Min)	20%

Fuente: ASME/ASTM A53

7.8. CORROSIÓN^[12]

Constantemente los metales están expuestos a la acción de la atmosfera, la cual está compuesta principalmente de 79 partes de nitrógeno y 21 partes de oxígeno. Como el nitrógeno es un gas muy poco activo, puede decirse prácticamente inerte, toda la acción atmosférica depende de la actividad del oxígeno, que no es mucha por encontrarse en estado molecular. Por otra parte, los metales son muy estables, resulta que, sin la intervención de otro agente, la acción del oxígeno solo sobre los metales resulta muy débil.

Los agentes colaboradores del oxígeno son dos: el calor y la humedad. El oxígeno con el calor produce la oxidación de los metales; y el oxígeno con la humedad produce la corrosión.

La corrosión se define, en general, como la degradación lenta y progresiva de un metal por la acción del ambiente en el que está inmerso. Uno de los factores que afectan y limitan la vida de las piezas metálicas en servicio es el ataque químico o físico-químico que sufren en el medio que les rodea.

Como ya se ha dicho, los metales están continuamente expuestos a la acción atmosférica, la cual consta principalmente de 79 partes de nitrógeno y 21 partes de oxígeno. Los metales son por lo general bastante estables por lo que sin colaboración de otro agente la acción del oxígeno sobre estos es muy débil.

Por lo tanto, la corrosión atmosférica es la producida por la acción combinada del oxígeno del aire y la humedad. Pero existe además la corrosión química producida por la acción de ácidos y álcalis.

Como en la atmosfera siempre existe la humedad a la temperatura ambiente, los metales se destruyen más por corrosión que por la oxidación. Favoreciendo a tener efectos mucho mayores en los metales que se encuentren en contacto directo con agua.

La fuerza conductora que causa que un metal se oxide es consecuencia de su existencia natural en forma combinada (oxidada). Para alcanzar este estado metálico, a partir de su existencia en la naturaleza en forma de diferentes compuestos químicos (minerales), es necesario que el metal absorba y almacene una determinada cantidad de energía.

Esta energía permitirá el posterior regreso a su estado original a través de un proceso de oxidación (corrosión). La cantidad de energía requerida y almacenada varía de un metal a otro.

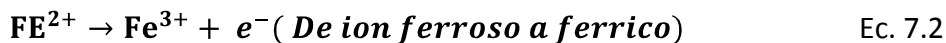
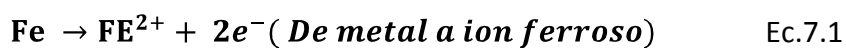
La termodinámica permite realizar los balances de energía que, para el caso de los metales puros colocados en una situación bien determinada, permitirán predecir su comportamiento; en este caso, si aparecerá o no en ellos tendencia a la corrosión.

La energía de un determinado sistema puede medirse en los términos de lo que se llama la energía libre. Se pueden presentar tres casos:

- a) La energía libre es positiva. El metal es activo y puede haber corrosión. Es el caso más frecuente entre los metales de uso común.
- b) La energía libre es positiva, pero el metal en vez de presentar corrosión, permanece no atacado aparentemente. Se dice que el metal está pasivo o pasivado.
- c) La energía libre es cero o negativa. El metal es indiferente a los agentes agresivos habituales, no siendo posible ninguna reacción de la corrosión. Es el caso de los metales nobles.

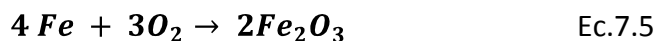
El hierro, en presencia de la humedad y del aire, se transforma en óxido. La corrosión, en el caso de los metales, es el paso del metal en estado libre al combinado mediante un proceso de oxidación.

Para que un metal pase del estado libre al estado combinado, es preciso que ceda electrones (en términos químicos que se oxide). Así, en el hierro pueden tener lugar las transformaciones:

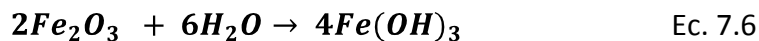


Estas transformaciones solo tienen lugar en presencia de elementos capaces de captar electrones (oxidantes: O₂, S, Cl₂, Br₂, I₂, H⁺, etc.).

Así, con el oxígeno seco, a temperatura elevada, tiene lugar la reacción:



Con oxígeno húmedo, a la temperatura ambiente:



Mecanismo según el cual se produce el óxido o herrumbre del hierro.

Por lo tanto, la acción corrosiva del aire es un efecto combinado de la humedad, contaminaciones gaseosas (principalmente óxidos de azufre) y partículas sólidas.

Depende, por tanto también, de la situación geográfica, pues los productos de la corrosión son distintos: en el aire del campo son óxidos carbonatos, en las zonas industriales se encuentra ácido sulfúrico, mientras que junto al mar, contienen algunas sales.

7.8.1. TIPOS DE CORROSIÓN SEGÚN SUS CAUSAS^[13]

La corrosión es un fenómeno muy complejo, cuyas verdaderas causas y forma de actuar no se han aclarado por completo. Actualmente, sin embargo, se admite que la corrosión se produce por dos clases de acciones fundamentales: por acción electroquímica y por acción exclusivamente química.

7.8.1.1. CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA

La corrosión electroquímica ocurre cuando dos o más reacciones electroquímicas tienen lugar en la superficie de un metal. Como resultado, algunos de los elementos del metal o aleación cambian de un estado metálico a un estado no metálico. Los productos de la corrosión pueden ser especies en disolución o productos de la corrosión; en ambos casos, la energía del sistema se reduce a la vez que el metal se convierte a una forma menos energética.

El acero corroído es el ejemplo más conocido de la conversión de un metal (hierro) en un producto de corrosión no metálico (herrumbre). El cambio de energía del sistema es, por lo tanto, la fuerza conductora para los procesos de corrosión y el sujeto de la termodinámica.

Las reacciones electroquímicas o reacciones de oxidación-reducción pueden representarse en términos de una celda electroquímica. Las reacciones de oxidación tienen lugar en el electrodo denominado ánodo, y las reacciones de reducción ocurren en otro electrodo llamado cátodo. Así pues, los electrones viajan desde el metal (ánodo) a través de una disolución eléctricamente conductora (electrolito) hasta una zona catódica.

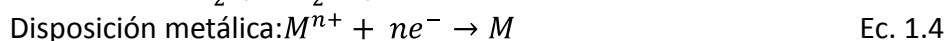
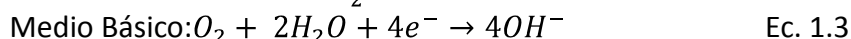
Los requisitos para que se produzca una celda electroquímica son:

1. Dos zonas con distinto potencial eléctrico:

- Una de ellas, que constituye el ánodo de la reacción, al ceder electrones sufrirá la corrosión:

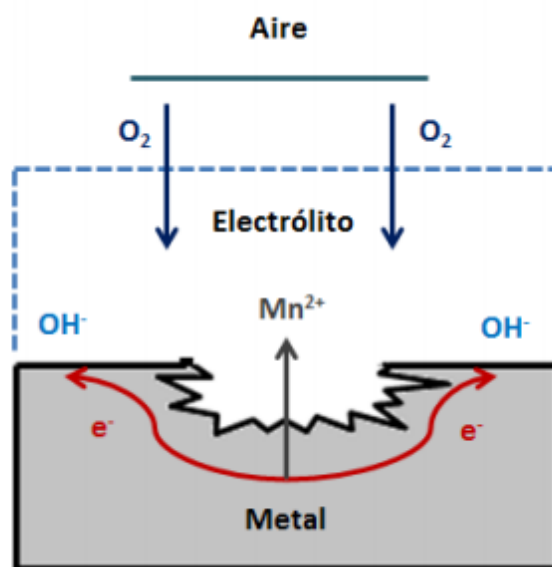


- La otra, que constituye el cátodo, absorberá los electrones cedidos por el ánodo:



2. Un electrolito, conductor eléctrico líquido, que contiene los elementos característicos del medio corrosivo.

Figura 6. Modelo simplificado de corrosión húmeda en un metal

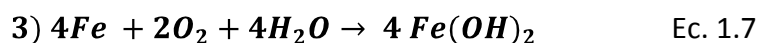


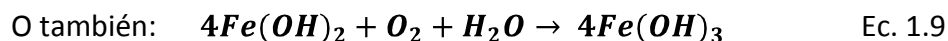
Fuente: L. Molina "Estudio avanzado de corrosión"

En el metal M, que constituye el ánodo, se produce una reacción de oxidación. Los cationes formados pasan a la disolución, mientras que los electrones se desplazan (el propio metal actúa de conductor eléctrico) a zonas catódicas.

En disoluciones neutras o básicas, las reacciones habituales se presentan en la ecuación del medio básico (descrita anteriormente). Los cationes metálicos, presentes en la disolución, reaccionan formando hidróxidos metálicos y/o óxidos metálicos hidratados.

En el caso del acero, el proceso de corrosión fundamental en condiciones húmedas es el siguiente:





Se trata de una pila electroquímica en la que el hierro constituye el ánodo y tiende a transformarse en el ión hierro soluble en el electrolito (ecuación 1.5). Los electrones procedentes de la reacción anterior se desplazan a otras zonas del metal, que se comportan catódicamente, donde reaccionan con el oxígeno y el agua, en un proceso de reducción (ecuación 1.6).

El conjunto de estas dos reacciones da como resultado la formación de hidróxido ferroso (ecuación 1.7), que es inestable y reacciona con el oxígeno del aire o del agua, produciendo óxido férrico hidratado u óxido férrico (ecuaciones 1.8 y 1.9), de color marrón anaranjado, que constituye el principal producto de la corrosión y se denomina comúnmente herrumbre.

En cualquier reacción química, la tendencia a realizarse se mide por la reacción libre de Gibbs. Teniendo en cuenta que durante la reacción química existe transferencia de cargas eléctricas, la energía libre de Gibbs puede representarse en función del número de electrones intercambiados n , de la constante de Faraday F , y del potencial al que tiene lugar el proceso E , según la ecuación 1.10

$$\Delta = -nFE \quad \text{Ec. 1.10}$$

La diferencia de potenciales electroquímicos permite determinar el mecanismo de corrosión, a la vez que conocer qué zonas actúan como ánodo y cátodo. Según convenio, un signo negativo en la Ecuación 1.9 indica la tendencia del sistema a la oxidación, mientras que el positivo todo lo contrario.

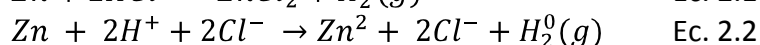
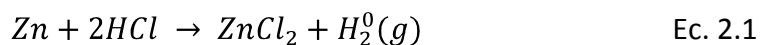
$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{(ox)}{(red)} \quad \text{Ec. 1.11}$$

El cambio de potencial puede expresarse según la ecuación de Nernst, que se presenta en la ecuación 1.11, donde: E^0 es el potencial del electrodo en condiciones estándar y (ox) y (red) son las actividades de las especies oxidadas y reducidas, respectivamente.

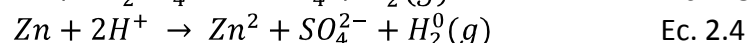
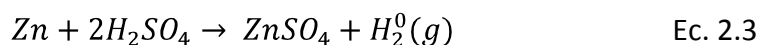
7.8.1.2. CORROSIÓN QUÍMICA^[13]

7.8.1.2.1. ACCIÓN DE LOS ÁCIDOS NO OXIDANTES (ácido sulfúrico, clorhídrico, etc.)

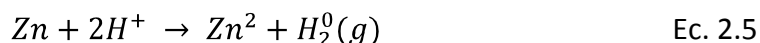
Una de las formas más comunes de la generación de hidrógeno en un laboratorio es colocar Zinc en un ácido diluido, tal como ácido clorhídrico o sulfúrico. Cuando se hace esto, hay una reacción rápida en el que el Zinc es atacado o "disuelto" y el hidrógeno se desarrolla como un gas. Esto se muestra en las ecuaciones. (2.1) a (2.5):



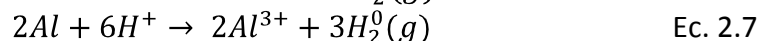
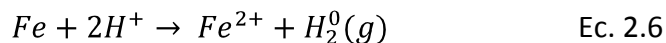
En las ecuaciones (2.1) y (2.2) son la abreviatura química para la siguiente declaración: Un átomo de zinc y dos moléculas de ácido clorhídrico se disocian en forma de iones H^+ y Cl^- y se convierten en una molécula de cloruro de zinc en la ecuación (2.1) [escrito como una sal soluble en forma de Zn^{2+} y iones Cl^- en la ecuación (2.2)], más una molécula de gas de hidrógeno que se desprende. Cabe señalar que los iones cloruro no participan directamente en esta reacción, a pesar de que podrían desempeñar un papel importante en situaciones de corrosión reales. De manera similar, el zinc se combina con ácido sulfúrico para formar sulfato de zinc (una sal) y el gas de hidrógeno como se muestra en las ecuaciones. (2.3) y (2.4):



Tenga en cuenta que cada átomo de una sustancia que aparece en la parte izquierda de estas ecuaciones también debe aparecer en el lado derecho. También hay algunas reglas que denotan en qué proporción diferentes átomos se combinan entre sí. Al igual que en la reacción anterior, los iones de sulfato que son una parte integral de ácido sulfúrico no participan directamente al ataque de la corrosión y por lo tanto se podría escribir tanto las ecuaciones. (2.2) y (2.4) en una forma más simple:



Muchos otros metales también son corroídos por los ácidos, a menudo produciendo sales solubles y de gas de hidrógeno, como se muestra en las ecuaciones (2.6) y (2.7) para el hierro y el aluminio, respectivamente:

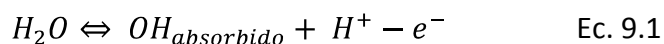


Tenga en cuenta que el zinc y el hierro reaccionan con dos iones H^+ , mientras que el aluminio reacciona con tres. Esto es debido al hecho de que tanto el zinc y el hierro, cuando la corrosión, pierden dos electrones y muestran dos cargas positivas en su forma iónica. Ellos se dice que tienen una valencia de 2, mientras que el aluminio pierde tres electrones al salir de una superficie anódica y por lo tanto muestra tres cargas positivas y se dice que tiene una valencia de 3. Algunos metales tienen varias valencias comunes, otros sólo uno.

7.9. EFECTO DE LAS VARIABLES AMBIENTALES^[12]

La corrosión implica la interacción (reacción) entre un metal o aleación y el ambiente que lo rodea. Las variables ambientales más importantes por las que la corrosión se ve afectada son: el pH (acidez), la fuerza oxidante (potencial), la temperatura (transferencia de calor), y la concentración (constituyentes en disolución). Otro aspecto de importante consideración es la influencia de organismos biológicos.

- Efecto del pH: El concepto del pH está relacionado con la concentración de hidrógeno o cantidad de ácido. La importancia del ión hidrógeno recae en su capacidad para interactuar con la superficie del metal o aleación. Muchas aleaciones de interés comercial forman una capa oxidada que contiene especies del tipo hidróxido cuando se encuentran en presencia de agua. Esta estructura tiende a tener dependencia de la concentración del ión hidrógeno, posiblemente a través de una reacción del tipo:



En el caso del acero, la velocidad de corrosión es elevada a pH muy bajo, es independiente del pH en un rango de pH neutro, decrece con el aumento del pH, y finalmente se incrementa nuevamente a pH muy elevado.

- Potencial: El potencial se relaciona con la capacidad para añadir o retirar electrones del metal en reducir u oxidar su superficie. Algunas aplicaciones prácticas incluyen el incremento de la pasividad alterando la superficie oxidada (protección anódica); o la prevención de la corrosión con la provisión de electrones al metal que está afectado por la corrosión (protección catódica).
- Temperatura: La temperatura puede afectar a la corrosión de diversas maneras. Si la velocidad de corrosión está gobernada completamente por el proceso elemental de la oxidación del metal, la velocidad de corrosión crece exponencialmente con un incremento de la temperatura. La relación queda reflejada en la expresión de Arrhenius, según la ecuación:

$$r = A \exp \frac{-E}{RT} \quad \text{Ec.9.2}$$

Donde r es la velocidad de corrosión, A es un factor pre-exponencial, E es la energía de activación, R es la constante de los gases, y T es la temperatura absoluta.

- Concentración: De la misma forma que el pH, la concentración de distintos constituyentes puede influenciar en el comportamiento de la corrosión. Por ejemplo, los yoduros y bromuros pueden inhibir la corrosión; mientras que la presencia de cloruros aumenta la velocidad de corrosión de forma proporcional a su concentración.

- Efectos biológicos: Los organismos biológicos se encuentran presentes en todos los ambientes acuáticos naturales. La tendencia de estos organismos es atacar y crecer en la superficie del material, dando lugar a la formación de películas biológicas o “biofilms”. Estas películas influyen en la corrosión de los metales ya que los organismos tienen la capacidad de modificar las variables ambientales discutidas previamente. El resultado puede ser la iniciación de la corrosión bajo condiciones en las que no se hubiera iniciado, a no ser por la presencia de dicho film.

7.10. EFECTO DE LAS VARIABLES METALÚRGICAS^[12]

La estructura y la composición de metales y aleaciones son de básica importancia en la determinación de los procesos de corrosión. Por lo tanto, la estructura cristalina, el tipo de aleación y el tratamiento térmico empleado desempeñan un papel fundamental frente a la corrosión.

- Estructura cristalina: Los metales se forman según una serie de cristales no siempre regulares. En un mismo metal es posible encontrar distintas estructuras cristalinas (bcc, fcc, hcp, etc.), dando lugar a un error en la secuencia normal de apilamiento de las distintas capas atómicas. También es posible que se produzcan deslizamientos en los distintos planos que separan dos regiones de un cristal; o bien dislocaciones y defectos puntuales. Por otra parte, los límites de granos constituyen las zonas donde existe una mayor congregación de fallos y dislocaciones; y donde las impurezas tienden a acumularse.

A efectos termodinámicos, las imperfecciones presentan un potencial de corrosión en equilibrio inferior al del grano. Esto no implica que los límites de grano se corroan siempre preferentemente, ya que el ataque inicial del límite de grano provocará un incremento en la superficie de esta región, que a su vez, hará decrecer la energía libre total de la zona.

- Aleación: Una de las razones primarias para producir aleaciones es la mejora de la resistencia a la corrosión. Esto se puede conseguir con el aumento de la nobleza de la aleación (añadiendo oro, platino o paladio); o bien añadiendo cantidades controladas de ciertos elementos aleantes que mejoran la estabilidad y la protección de la capa de óxido formada sobre el metal.
- Tratamientos térmicos: Muchas de las propiedades mecánicas de los materiales pueden mejorarse mediante tratamientos térmicos. Desafortunadamente, propiedades como la dureza y la resistencia se consiguen a cambio de empeorar la resistencia a la corrosión.

7.11. FORMAS DE CORROSIÓN^[12]

Según la apariencia, las distintas formas de corrosión se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Corrosión Uniforme**

El ataque se distribuye a lo largo de la superficie, y consecuentemente conduce a una reducción relativamente uniforme del grosor de la superficie.

- **Corrosión Galvánica**

Tiene lugar cuando se produce un contacto entre un metal noble y uno menos noble, disminuyendo la velocidad de corrosión en el primero y aumentando en el segundo.

- **Corrosión termo-galvánica**

Se produce cuando un material en un ambiente corrosivo está sujeto a un gradiente de temperatura. Normalmente la superficie caliente forma el ánodo y la fría el cátodo.

- **Corrosión por grietas**

Se trata de corrosión localizada en grietas en las que el espacio es suficientemente amplio como para que penetre líquido, y a la vez suficientemente estrecho como para que se estanque.

- **Corrosión por picadura**

Normalmente ocurre en metales o aleaciones pasivados en ambientes con contenido en cloruros, bromuros, ioduros o percloratos. Se caracteriza por picaduras estrechas, del mismo radio.

- **Corrosión intergranular**

Se trata de un ataque localizado en los límites de grano, que se propaga a lo largo del material.

- **Corrosión selectiva**

Se observa en las aleaciones en las que el elemento es claramente más noble que el otro. El mecanismo de corrosión implica que el elemento menos noble sea retirado del material.

- **Corrosión por erosión y abrasión**

Tiene lugar cuando existe un movimiento relativo entre un fluido corrosivo y la superficie del metal, dando lugar al desgaste.

- **Corrosión por cavitación**

Se trata de un tipo de corrosión estrechamente relacionado con la corrosión por erosión. Los ataques por cavitación producen picaduras perpendiculares a la superficie.

- **Corrosión por fricción**

Ocurre en la interfaz entre dos componentes muy próximos que están sujetos a deslizamientos repetitivos entre ellos.

- **Corrosión bajo tensión**

Se define como quebradura formada por los efectos simultáneos de las tensiones internas en el material y ataque localizados por agrietamiento

- **Corrosión por fatiga**

A diferencia de la corrosión por estrés, la tensión no es estática, sino que varía con el tiempo.

7.12. TÉCNICA PÉRDIDA DE MASA^[14]

El método pérdida de peso relaciona el daño causado por la corrosión con pérdida de peso en los materiales. Las pruebas de inmersión total que emplean el método de pérdida de peso consisten en exponer piezas pequeñas de metal a ambientes corrosivos, para determinar la pérdida de peso del material después de la prueba.

Este método es uno de los más usados en estudios de oxidación y corrosión para determinar el grado de afectación en los metales. Esto se debe a que los resultados obtenidos por este método son considerados confiables, al asemejarse a resultados obtenidos en pruebas en planta; si se cuidan las condiciones al realizar las pruebas. Las pruebas de corrosión mediante el método de pérdida de peso se consideran más rápido y satisfactorio para hacer una selección preliminar de los mejores materiales en estudio para una determinada aplicación.

Existen diferentes aparatos para determinar la velocidad de corrosión mediante este método. Los aparatos que determinan de forma continua el peso del testigo son muy populares en academia para realizar estudios de corrosión. Lo anterior se debe a que pueden recopilarse datos de la cinética de la reacción. Por otro lado, la principal desventaja es que solo una muestra o testigo puede ser analizado en cada corrida, lo cual hace que el generar datos comparativos para varios tipos de sistemas y materiales sea un proceso largo.

7.13. ENSAYO DE TENSIÓN^[15]

Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada. Este ensayo consiste en colocar en la máquina universal de pruebas una probeta debidamente normalizada y estandarizada por ASTM E8 y se le aplica una fuerza P , denominada carga y para determinar el porcentaje de alargamiento que sufrió el material debido a esta carga se utiliza un extensómetro.

Este ensayo permite definición del esfuerzo ingenieril y la deformación dadas por la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Ec. 13.1}$$

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad \text{Ec. 13.2}$$

Determinado por:

A_0 = Área original de la sección transversal de la probeta antes del inicio del ensayo.

l_0 = Distancia original entre marcas calibradas

l = Distancia entre las mismas, después de haberse aplicado la fuerza F .

- **Propiedades elásticas**

El modulo elástico o módulo de Young, es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en su región elástica. Esta relación es la ley de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Ec. 13.3}$$

Este módulo está íntimamente relacionado con la energía de enlace de los átomos. Una pendiente muy acentuada o abrupta en la gráfica fuerza-distancia en la zona de equilibrio indica que se requieren de grandes fuerzas para separar los átomos y hacer que el material se deforme elásticamente. Por tanto, el material tiene un módulo de elasticidad alto.

La ductilidad mide el grado de deformación que puede soportar un material sin romperse. Se puede medir la distancia entre las marcas calibradas en una probeta antes y después del ensayo. El % de elongación representa la distancia que la probeta se alarga plásticamente antes de la fractura:

$$\% \text{ de } \textbf{Elongacion} = \frac{l_f-l_0}{l_0} \quad \text{Ec. 13.4}$$

Donde l_f es la distancia entre las marcas calibradas después de la ruptura del material.

Un segundo método para medir la ductilidad es calcular el cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después del ensayo. El porcentaje de reducción en área expresa el adelgazamiento sufrido por el material durante la prueba:

$$\% \text{ de } \textbf{Reduccion de area} = \frac{A_0-A_f}{A_0} \quad \text{Ec. 13.5}$$

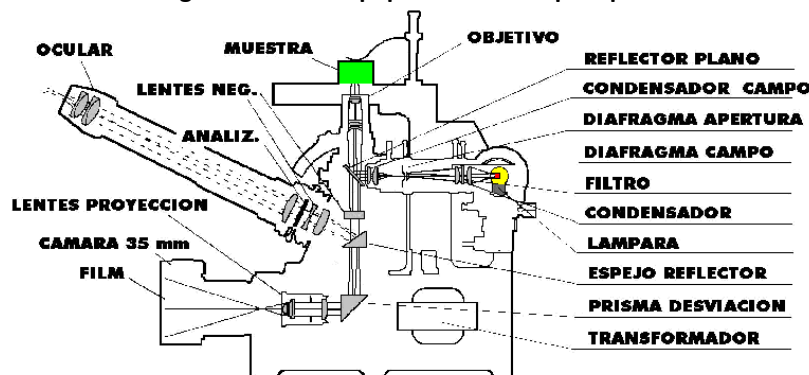
Donde A_f es el área de la sección transversal en la superficie de la fractura.

7.14. MICROSCOPIA ÓPTICA^[16]

Esta técnica que se basa en la ampliación de la imagen de un objeto mediante el uso de lentes convergentes en donde se puede realizar una aproximación a la estructura atómica del material y por tanto sus propiedades reflejadas en la morfología del material mediante este análisis microscópica.

Esta técnica se basa en el reflejo de la luz en la muestra metalográfica, ya que la muestra metalográfica es opaca a la luz, esta debe ser iluminada por luz reflejada. De manera que un haz de luz horizontal de alguna fuente de luz contenida en el equipo, es reflejado por medio de un reflector de vidrio plano hacia abajo, a través del objetivo del microscopio sobre la superficie de la muestra. Un poco de esta luz incidente reflejada desde la superficie de la muestra se amplificará al pasar a través del sistema inferior de lentes, el objetivo, y continuará hacia arriba a través del reflector de vidrio plano; luego, una vez más lo amplificará el sistema superior de lentes, el ocular.

Figura 7. Partes equipo de microscopia óptica



Fuente: www.esi2.us.es

7.15. MICRODUREZA^[17]

La dureza mide la resistencia de la superficie de la capa superficial de un material a resistir alguna deformación elástica, plástica o daño mediante la aplicación de esfuerzos locales relacionados causados por otro cuerpo más duro denominado indentador o penetrador; el cual no sufre deformaciones residuales de determinada forma y dimensiones relacionado con el tipo de ensayo a realizar.

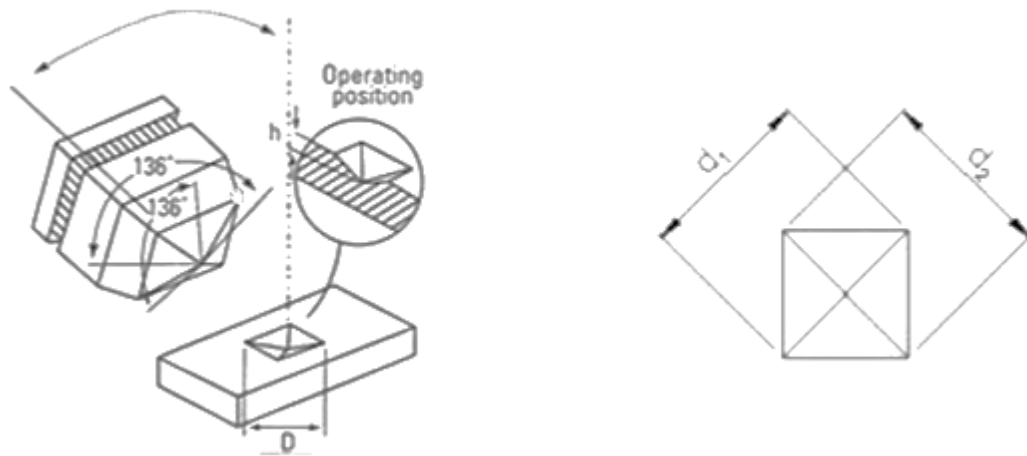
En el ensayo de microdureza Vickers se toma un penetrador piramidal con un ángulo de 136° entre las caras opuestas del vértice. Es presionado contra la superficie de la muestra utilizando una fuerza F determinada, y, de una vez que esta fuerza se ha retirado, se mide ópticamente diagonales d_1 y d_2 de la huella de forma cuadrada que deja en la muestra.

El resultado de la dureza Vickers HV viene dado por la siguiente fórmula:

$$HV = 1854.4 \times \frac{P}{d^2}$$

Siendo HV numero de dureza en Vickers, dla media aritmética (μm) de las diagonales d_1 y d_2 ; y P la carga utilizada para realizar el ensayo.

Figura 8. Indentador para Dureza Vickers



Fuente: ASTM E94-99

8. MARCO LEGAL Y NORMATIVO

ASTM E 92-82 (2003): Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials, estándar ASTM E92 presenta las siguientes exigencias a las probetas usadas para la medición de la dureza Vickers: Para evitar que el efecto de la indentación aparezca en el lado opuesto de la probeta, el espesor de ésta debe ser al menos 1,5 veces más que la longitud de la diagonal. La superficie debe ser lijada y pulida de manera que se observen con claridad los bordes de la huella en el momento de la medición con la precisión necesaria. La probeta debe ser montada de tal forma que la superficie esté en la normal del eje del indentador con una desviación máxima de $\pm 1^\circ$.

ASTM G1-03 (2011): Práctica Estándar para la preparación, limpieza y evaluación de muestras de ensayos de corrosión.

NACE TM0284-96: Método de prueba estándar- evaluación de tuberías y aceros para recipientes a presión. Resistencia al agrietamiento inducido por hidrogeno.

ASTM E8: Describe los métodos de prueba de tensión para determinar el limite elástico, alargamiento, resistencia a la tracción y reducción de superficie de productos metálicos.

ASTM E381-01 (2012): Es una prueba sencilla que proporciona información acerca de la relativa homogeneidad de la muestra. El método emplea la acción de un ácido u otro agente corrosivo para desarrollar las características micro estructurales de un espécimen adecuadamente preparado.

9. MARCO CONCEPTUAL

Energía geotérmica: Obtención de calor para calefacción y para producción de energía eléctrica mediante el uso del vapor producido por las altas temperaturas del interior de la Tierra. El calor interno de nuestro planeta produce el derretimiento de las rocas y el calentamiento de las aguas subterráneas y los gases subterráneos calientan el agua de las capas inferiores, la que emana a la superficie en forma de vapor o líquido caliente. Estas erupciones, intermitentes, normalmente las encontramos en zonas volcánicas y se conocen con el nombre de géiser ^[18].

Entalpia: Es la cantidad de energía térmica que un fluido, o un objeto, puede intercambiar con su entorno. Se expresa en kJ/kg o en kcal/kg ^[19].

Conductividad térmica: Es una propiedad característica de cada material que indica su capacidad para conducir el calor. Se expresa en $W/m \cdot ^\circ C$ ^[20]

Los mecanismos por los que se propaga el calor en cualquier medio son conducción, convección y radiación, los cuales se definen como:

Conducción: Es la transferencia de calor a través de un medio por interacción entre partículas adyacentes. Puede tener lugar en sólidos, líquidos y gases, aunque es característica de los sólidos, puesto que en gases y líquidos siempre se producirá convección simultáneamente. ^[21]

Convección: Es el modo en que se transfiere la energía térmica entre una superficie sólida y un fluido adyacente (líquido o gas). Comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido provocado por las diferencias de densidad del mismo. Las partículas más calientes del fluido y, por tanto, menos densas, ascienden, desplazando a las más frías, que se hunden por gravedad, dado que son más densas, y éstas, posteriormente, al calentarse, son empujadas otra vez hacia arriba. ^[22]

Radiación: Es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Radiación térmica: Es la radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. ^[23]

Pozo: Es un agujero, excavación o túnel vertical que perfora la tierra, hasta una profundidad suficiente para alcanzar lo que se busca, sea una reserva de agua subterránea del nivel freático o fluidos como el petróleo. Generalmente de forma cilíndrica, se suele tomar la precaución de asegurar sus paredes con ladrillo, piedra, cemento o madera, para evitar su deterioro y derrumbe. ^[24]

Corrosión: Llamamos corrosión a la oxidación espontánea de los metales. Se debe a un ataque destructivo del medio ambiente, a través de reacciones químicas o electroquímicas. En la corrosión electroquímica los átomos del metal son oxidados dejando la red del metal como iones, creando un exceso de electrones en la superficie del

metal. Estos electrones pueden ser transferidos a una especie activa en el electrolito produciéndose la reacción de reducción. La reacción de corrosión se conoce como reacción anódica y las áreas del electrodo donde ocurre se les llama ánodos. La electro-neutralidad de la materia exige que en otros puntos, conocidos por cátodos, se reduzca alguna sustancia del medio ambiente en contacto con el material metálico. ^[25]

Dureza: Es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes; entre otras. También puede definirse como la cantidad de energía que absorbe un material ante un esfuerzo antes de romperse o deformarse. Por ejemplo: la madera puede rayarse con facilidad, esto significa que no tiene mucha dureza, mientras que el vidrio es mucho más difícil de rayar. ^[26]

pH: El pH (potencial de hidrógeno) es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias. La sigla significa "potencial de hidrógeno" (pondus Hydrogenii o potentia Hydrogenii; del latín pondus, n. = peso; potentia, f. = potencia; hydrogenium, n. = hidrógeno). Este término fue acuñado por el químico danés Sørensen, quien lo definió como el logaritmo negativo en base 10 de la actividad de los iones hidrógeno. ^[27]

Salmuera: Es agua con una alta concentración de sal (NaCl) disuelta. Existen ríos y lagos salados en donde no hay vida por el exceso de sal y de donde se extrae la salmuera, principalmente para obtener su sal evaporando el agua en salinas. La salmuera puede ser venenosa para algunos animales que beben de esta. ^[28]

Acero: Es la denominación que comúnmente se le da en ingeniería metalúrgica a una aleación de hierro con una cantidad de carbono variable entre el 0,088% y el 2,11% en peso de su composición, aunque normalmente estos valores se encuentran entre el 0,2% y el 0,3%. Si la aleación posee una concentración de carbono mayor al 2,0% se producen fundiciones que, en oposición al acero, son quebradizas y no es posible forjarlas sino que deben ser moldeadas. ^[29]

Electrolito: Es cualquier sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico. Debido a que generalmente consisten en iones en solución, los electrolitos también son conocidos como soluciones iónicas, pero también son posibles electrolitos fundidos y electrolitos sólidos. ^[30]

Temperatura: Es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente, tibio, frío que puede ser medida, específicamente, con un termómetro. En física, se define como una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica. Más específicamente, está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como "energía cinética", que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido translacional, rotacional, o en forma de vibraciones. ^[31]

Grieta: Es una abertura larga y estrecha producto de la separación de dos materiales. En Geología se pueden distinguir dos tipos comunes de grietas: las grietas de contracción y las grietas en cuña. ^[32]

Tubería: es un conducto que cumple la función de transportar agua u otros fluidos. Se suele elaborar con materiales muy diversos. Cuando el líquido transportado es petróleo, se utiliza la denominación específica de oleoducto. Cuando el fluido transportado es gas, se utiliza la denominación específica de gasoducto. También es posible transportar mediante tubería o nada materiales que, si bien no son un fluido, se adecúan a este sistema: hormigón, cemento, cereales, documentos encapsulados, etcétera. ^[33]

Fluido: Se denomina fluido a un tipo de medio continuo formado por alguna sustancia entre cuyas moléculas hay una fuerza de atracción débil. Los fluidos se caracterizan por cambiar de forma sin que existan fuerzas restitutivas tendentes a recuperar la forma "original" (lo cual constituye la principal diferencia con un sólido deformable). Un fluido es un conjunto de partículas que se mantienen unidas entre sí por fuerzas cohesivas débiles y/o las paredes de un recipiente; el término engloba a los líquidos y los gases. En el cambio de forma de un fluido la posición que toman sus moléculas varía, ante una fuerza aplicada sobre ellos, pues justamente fluyen. Los líquidos toman la forma del recipiente que los aloja, manteniendo su propio volumen, mientras que los gases carecen tanto de volumen como de forma propios. Las moléculas no cohesionadas se deslizan en los líquidos, y se mueven con libertad en los gases. Los fluidos están conformados por los líquidos y los gases, siendo los segundos mucho menos viscosos (casi fluidos ideales). ^[34]

Reactivo: Es en química, toda sustancia que interactúa con otra en una reacción química que da lugar a otras sustancias de propiedades, características y conformación distinta, denominadas productos de reacción o simplemente productos. Por tratarse de compuestos químicos, los reactivos se pueden clasificar según muchas variables: propiedades fisicoquímicas, reactividad en reacciones químicas, características del uso del reactivo. ^[35]

Cambio de estado: En física y química se denomina a la evolución de la materia entre varios estados de agregación sin que ocurra un cambio en su composición. Los tres estados más estudiados y comunes en la Tierra son el sólido, el líquido y el gaseoso; no obstante, el estado de agregación más común en nuestro universo es el plasma, material del que están compuestas las estrellas (si descartamos la materia oscura). ^[36]

10. DISEÑO METODOLÓGICO

10.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto de investigación se define como cuantitativa- descripción: debido a que se pretende decir cómo es y cómo se manifiesta el fenómeno de la corrosión en el acero ASTM A-53 GRADO B sometido a un medio específico por el método gravimétrico.

De igual manera se pretende exponer las probetas a medios con características medibles y posteriormente realizar la medición del cambio en sus propiedades. Los ensayos se realizarán en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Libre.

10.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

En primera medida se pretende evaluar las propiedades mecánicas, micro estructurales y resistencia a la corrosión del acero ASTM A53 GRADO B, antes y después de someterlo a fluidos corrosivos; para ello se emplearán los fluidos ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido clorhídrico (HCl)^[3,5], esto se llevará a cabo por medio de pruebas de pérdida de masa (Método Gravimétrico), la cual evaluará la corrosión producida por los fluidos corrosivos en estado líquido y vapor.

La prueba pérdida de masa cuantifica el ataque corrosivo debido a la incrustación de hidrógeno en el material, para ejecutar este ensayo se requiere de dos (3) pruebas con los dos (2) fluidos corrosivos en estado líquido y de igual forma en vapor, teniendo en cuenta el tiempo de exposición.

Posteriormente, se deben establecer los cambios micro estructurales mediante microscopía óptica convencional, con el fin de evaluar el cambio micro estructural en el acero ASTM A53 GRADO B antes y después de ser sometido a fluidos corrosivos, el cual consiste en llevar a cabo un pulido espejo de las probetas a ensayar, a continuación mediante el microscopio óptico convencional se realiza un análisis óptico de la superficie afectada por la corrosión.

De igual manera se pretende determinar las propiedades mecánicas del acero ASTM A53 GRADO B se realizará el ensayo de micro dureza, el cual es un método que se utiliza para medir la resistencia de un material al ser penetrado. La huella producida por este método es tan pequeña que será observada con la ayuda de un microscopio para ser medida y valorada para su posterior análisis en términos de dureza, asimismo se realizará el ensayo de tensión en donde se someterá una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material sometido a una fuerza estática aplicada lentamente.

Posteriormente se llevará a cabo el análisis de los resultados obtenidos por estas pruebas, caracterizando el comportamiento del acero ASTM A53 GRADO B en una posible aplicación en centrales geotérmicas en Colombia.

10.3. TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

El proceso que se realizó para la recolección de información acerca del proyecto se basó en la búsqueda en bases de datos mediante el portal de la universidad, de investigaciones realizadas relacionadas con el tema seleccionado, de igual manera, se tomaron como base investigaciones realizadas en otras plantas de energía geotérmica para generar un posible comportamiento del acero. En especial se tomó como guía las investigaciones realizadas por el Dr. Helmuth Sarmiento Klapper, ingeniero de materiales que realiza investigaciones en este campo en Baker Hughes.

Adquiriendo un buen marco teórico y conocimiento adecuado del tema.

10.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

Aplicando las técnicas del diseño estadístico del Dr. Taguchi se efectuaron ensayos para evaluar las propiedades mecánicas, microestructurales y resistencia a la corrosión del acero ASTM A53 Gr. B sometido a fluidos altamente corrosivos. Las variables independientes consideradas fueron el tipo de fluido corrosivo (H_2SO_4 , HCL)^[3,5], el estado de los fluidos de exposición y el tiempo de prueba, según sugerencias por asesores y por el laboratorio de Química de la Universidad Libre, se tomaron tiempos en relación 1:10 en Horas, según lo establecido en la Norma^[37], por lo tanto se cuenta con tres (3) factores a considerar. En la tabla 3 se puede observar los factores de control tomados en cuenta:

Tabla 3. Descripción de Factores de Control

FACTOR	DESCRIPCIÓN	NIVEL I		NIVEL II
A	FLUIDO	H_2SO_4		HCL
B	ESTADO	Estado liquido		Estado Vapor.
C	TIEMPO DE EXPOSICIÓN	1,5 Horas	3 Horas	4,5 Horas

Fuente: El autor

Por lo tanto es un arreglo ortogonal, de manera que se analizaran 12 posibilidades mostradas en la tabla:

Tabla 4. Distribución de Factores de Control

No.	A	B	C	FLUIDO	TIEMPO	Temperatura
1	1	1	1	H ₂ SO ₄	1,5 h	Estado liquido
2	1	1	2	H ₂ SO ₄	3 h	Estado liquido
3	1	1	3	H ₂ SO ₄	4,5 h	Estado liquido
4	1	2	1	H ₂ SO ₄	1,5 h	Estado Vapor
5	1	2	2	H ₂ SO ₄	3 h	Estado Vapor
6	1	2	3	H ₂ SO ₄	4,5 h	Estado Vapor
7	2	1	1	HCL	1,5 h	Estado liquido
8	2	1	2	HCL	3 h	Estado liquido
9	2	1	3	HCL	4,5 h	Estado liquido
10	2	2	1	HCL	1,5 h	Estado Vapor
11	2	2	2	HCL	3 h	Estado Vapor
12	2	2	3	HCL	4,5 h	Estado Vapor

Fuente: El autor

Como variables en el proceso estadístico se tomara un nivel de confianza del 95% y 5% de error.

Este método de investigación se ejecutara de igual forma para cada una de las pruebas a realizar, es decir para realizar las técnicas de microdureza, metalografía, resistencia a la tracción y resistencia a la corrosión por pérdida de masa.

De igual forma a través de la norma se puede verificar que las características a medir en este proyecto competen muchas áreas, estas características son: Metalografía, Perfiles de dureza, Resistencia a la tracción, Límite elástico, Porcentaje de alargamiento, Porcentaje de reducción de área, Composición química, Resistencia a la corrosión.

11. MATERIALES Y EQUIPOS

11.1. PREPARACIÓN DE PROBETAS

Para la primera etapa del proceso se realizó la segmentación del material a identificar en este caso el acero ASTM A-53 Gr. B Sin costura, dispuesto en forma de tubería con diámetro de 6" y SCH 40; en probetas estandarizadas para la prueba de tensión enunciadas en la norma API 1104 de dimensiones aproximadamente 9" (230 mm) de largo y 1" (25 mm) de ancho ajustadas al espesor nominal de la tubería, se procedió a realizar el corte de las mismas por la técnica de oxicorte según lo establecido en la norma anteriormente enunciada.

11.2. IDENTIFICACIÓN DE PROBETAS

Para la personalización de las probetas en cada una de las variantes de los ensayos y evaluar la velocidad de corrosión de estas según la normas anunciadas previamente se realiza la marcación de cada una de las probetas mediante marcadores de impacto desde el número 1 al número 36 y posteriormente el pesaje de cada una de las probetas mediante una balanza análoga previamente calibrada para cada una de las probetas; para ser luego comparada con el peso de la misma expuesta al ácido en las condiciones asignadas.

11.3. ETAPA DE LIMPIEZA

Para conseguir un estado más uniforme de las probetas estas se someten a limpieza antes de la prueba según la norma NACE RP0775 (ASTM G1-90), con grata manual y posteriormente a lavado mediante limpieza ultrasónica en el equipo WISECLEAN de la figura 9, sometiendo las probetas en arreglos de 5 a limpieza con acetona a temperatura de 30°C durante 20 minutos previamente a la inmersión al medio indicado, de igual forma antes de ser sometidas a cualquier medio se toma el peso de cada una de las probetas; además para evitar corrosión o deterioro de las probetas antes y después del ataque se humedecen en aceite mineral.

Figura 9. Equipo de limpieza ultrasónica



Fuente: Autores, Universidad Libre. Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Química.

11.4. INMERSIÓN EN ESTADO LÍQUIDO

El proceso de exposición se realiza con la inmersión de las probetas en cada uno de los ácidos en estado líquido con concentraciones de: H_2SO_4 de 97% y HCL de 37% de concentración, debido a que en estas concentraciones el Ácido es más puro por ende tiene un pH bajo y es altamente corrosivo, simulando condiciones extremas para evaluar el comportamiento del material (pH= 0 medido en ambos ácidos por: Indicador de pH universal), utilizando una probeta de vidrio de 500 mL con un contenido de 450 mL de ácido con el fin de cubrir en su totalidad la probeta, simulando las condiciones más extremas en un ambiente geotérmico durante el tiempo propuesto para la prueba (1,5, 3 y 4,5 horas). Teniendo en cuenta la emanación de gases inflamables y tóxicos se realiza la prueba en una cabina de extracción por seguridad y precaución dispuesta las probetas de la forma mostrada en la figura 10.

Figura 10. Arreglo Prueba de inmersión de Probetas en Estado Liquido



Fuente: Autores, Universidad Libre. Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Química.

11.5. INMERSIÓN EN ESTADO VAPOR

Se utilizó una dilución de ácido sulfúrico 5 Molar de 1400 mL, al cual se le suministro calor con el fin de que se evapore. Se elabora un arreglo en acrílico (envase) el cual en la primera etapa se encuentra la plancha (calentador) y el vaso precipitado con un contenido de 1400 mL de ácido, el cual se evapora y sube a la segunda etapa donde se encuentran las probetas de prueba, el vapor pasa por perforaciones en la lámina de acrílico de 1 cm de espesor mostrado en la figura 11. Cada probeta de prueba se encuentra suspendida amarrada por nylon a la parte superior de la tapa y en la parte superior de la tapa se realiza una perforación de 3" con tapa para el proceso de extracción de las probetas correspondientes. El tiempo transcurrido para que se concentre el vapor en la segunda etapa y comenzar con la prueba fue de 85 minutos para el ácido sulfúrico y de 45 minutos para el ácido clorhídrico.

Figura 11. Arreglo Prueba de inmersión de Probetas en Estado Vapor



Fuente: Autores, Universidad Libre. Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Química.

Las composiciones utilizadas para ÁcidoSulfúrico como para ÁcidoClorhídrico son mostradas a continuación; de manera que su composición sea de 5 molar, concentración sugerida por asesores por cuestiones de seguridad, trabajar un ácido tan puro genera peligro en el desarrollo de la prueba, además de mantener el pH entre 0-2 y su temperatura sea manejable.

H₂SO₄ – 5 M

$$\frac{97 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{100 \text{ g solución}} \times \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{98 \text{ g}} \times \frac{100 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \times \frac{1,84 \text{ G}}{\text{mL}} \quad \text{Ec.5.1}$$

$18,21 \text{ M} = \text{Concentracion inicial H}_2\text{SO}_4$

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2 \quad \text{Ec.5.2}$$

$$18,21 \text{ M} \times V_1 = 5 \text{ M} \times 1000 \text{ mL}$$

$$V_1 = \frac{5 \text{ M} \times 1000 \text{ mL}}{18,21 \text{ M}}$$

$$V_1 = 274,6 \text{ mL}$$

Se toman 274,6 mL de H₂SO₄ 98% y se completa un volumen de 1 L con agua destilada.

HCL37%

$$\frac{37 \text{ g HCL}}{100 \text{ g solución}} \times \frac{1 \text{ mol HCL}}{36,45 \text{ g}} \times \frac{100 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \times \frac{1,12 \text{ G}}{\text{mL}} \quad \text{Ec.5.3}$$

$11,36 \text{ M} = \text{Concentracion inicial HCL}$

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2 \quad \text{Ec.5.4}$$

$$11,36 \text{ M} \times V_1 = 5 \text{ M} \times 1000 \text{ mL}$$

$$V_1 = \frac{5 \text{ M} \times 1000 \text{ mL}}{11,36 \text{ M}}$$

$$V_1 = 440,14 \text{ mL}$$

Se toman 440,14 mL de HCL 37% y se completa un volumen de 1 L con agua destilada.

11.6. PRUEBA GRAVIMÉTRICA (Pérdida de Masa)

El proceso de cuantificación de la pérdida de masa se realiza inicialmente con la inmersión a las condiciones asignadas para cada una de las probetas y posteriormente se considera la pérdida de masa con la comparación de la masa de las muestras antes y después de ser sometidas a el ataque corrosivo propuesto, teniendo en cuenta el proceso de limpieza descrito anteriormente. Este proceso se realizó mediante una balanza manual ubicada en los laboratorios de la universidad libre.

11.7. MICROSCOPIA ÓPTICA CONVENCIONAL

Para realizar la técnica de microscopia óptica convencional se utiliza el equipo OLYMPUS PME 3 mostrado en la figura12, para este proceso se realiza el mismo proceso de preparación de las probetas anteriormente nombrado, estas se disponen de a 3 muestras por baquelita teniendo en cuenta que se extraen de las probetas originales y de dimensiones aproximadamente 5mm X 5mm, organizadas de tal forma que las tres probetas tengan las mismas características de exposición, de manera que se toma el lado de inferior de las probetas para cuantificar mediante esta técnica el avance de la corrosión y cambios en la superficie del material tanto interna como externamente. Posteriormente se realiza la metalografía con aumentos de 50x, 100x, 200x y 500x.

Figura 12. Equipo de Microscopia Óptica Convencional



Fuente: Autores, Universidad Libre. Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Materiales.

11.8. MICRODUREZA

El ensayo de microdureza se realizó mediante el Microdurómetro SHIMADZU mostrado en la figura 13, realizando la indentación utilizando un penetrador de tipo diamante. Calibrado teniendo en cuenta la estandarización de la norma ASTM E92, realizando pruebas de carga y seleccionando la carga de 300 gr y un tiempo de indentación de 15 segundos; parámetros que permitieron observar la disminución de la variación en los valores y una mejor definición de la huella en la probeta.

Figura 13. Microdurómetro SHIMADZU



Fuente: Autores, Universidad Libre. Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Materiales.

Se tomó un perfil de dureza de 7 indentaciones a lo ancho de la probeta, tres en sentido cóncavo externo hacia el medio, una en medio y tres en sentido cóncavo interno hacia el medio, con una separación de indentaciones de entre 40 y 60 μm , con el fin de evaluar el perfil de dureza del ancho de la probeta, comparado con una probeta patrón sin exposición a los ácidos corrosivos, así identificar la variación de la dureza desde la superficie externa a la superficie interna de la tubería de cerro ASTM A53 Gr. B.

11.9. ENSAYO DE TRACCIÓN

En este ensayo se analiza el comportamiento del acero al ser sometido a un esfuerzo de tensión uniaxial y se realiza mediante la máquina de ensayos universal marca SHIMADZU Ref. UH-50A, ubicado en los laboratorios de la universidad libre.

Sometiendo una probeta estandarizada por la norma API 1104 a una carga uniaxial gradualmente creciente y estática hasta que ocurra la falla del material. Iniciando con la preparación de cada una de las probetas, mediante el dimensionamiento de las probetas y una marcación de a 1 cm en toda la longitud de la probeta para realizar la comparación entre las longitudes de la probeta, en total se realizó el ensayo con 38 probetas, con un rango de carga de 10 Toneladas y una velocidad de aplicación de la misma de 5 mm/seg, valores establecidos directamente en la maquina universal de ensayos.

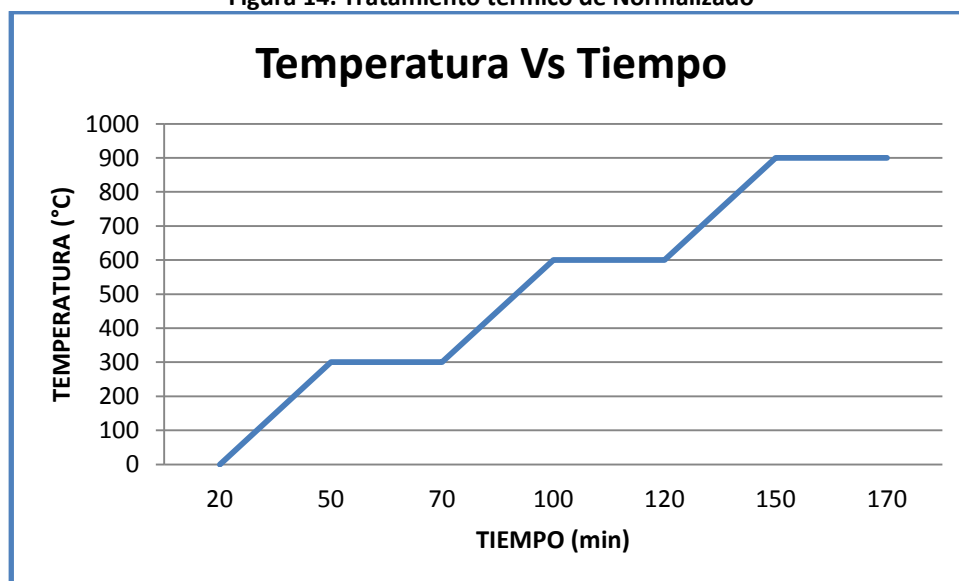
12. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

12.1. TRATAMIENTO TÉRMICO NORMALIZADO

Para la primera etapa del proceso se realizó la segmentación del material a identificar en este caso el acero ASTM A-53 Gr.B Sin costura, dispuesto en forma de tubería con diámetro de 6" y SCH 40; en probetas estandarizadas para la prueba de tensión enunciadas en la norma API 1104 de dimensiones aproximadamente 9" (230 mm) de largo y 1" (25 mm) de ancho ajustadas al espesor nominal de la tubería, se procedió a realizar el corte de las mismas por la técnica de oxicorte según lo establecido en la norma anteriormente enunciada.

Después del proceso de corte, la Norma API 1104 establece que se debe realizar un Tratamiento Térmico de Normalizado para cada una de las 42 probetas a una temperatura de 900°C^[38] y enfriamiento a temperatura ambiente, para este Tratamiento se realizó un calentamiento previo del Horno Mufla por 20 minutos. Se toma un aumento gradual de temperatura de 300°C hasta llegar a 900°C dejando que este se estabilice en cada aumento de temperatura por 30 minutos, seguido de mantener dicha temperatura por 20 minutos con el fin que se homogenice y distribuya el calor en cada una de las probetas, esta secuencia de acuerdo a la literatura^[39]; para la extracción debido a la cantidad de probetas se distribuyeron de tal forma que se retiraran en grupos de 5, manteniendo nuevamente a 900 °C por 10-15 minutos y de esta manera asegurar que las probetas ubicadas en el centro se verían igualmente tratadas térmicamente, indicado de la siguiente forma:

Figura 14. Tratamiento térmico de Normalizado



Fuente: Autores.

Seguido del tratamiento térmico se compara el material mediante probeta en Estado Natural directamente extraída por medio mecánico (segueta) y el material con tratamiento térmico (Normalizado) para determinar de esta forma sus propiedades mecánicas (Esfuerzo Ultimo) según especificaciones técnicas del fabricante.

Se utiliza como método de comparación la microscopia óptica convencional, para ello fueron embaquelitadas en una máquina empastilladora, mostrada en la figura 15, posteriormente se realiza el proceso de pulido con Lija al agua iniciando con 80 hasta 1500, y consecutivamente pulido con paño utilizando alúmina de 3,1 y 0,3 Micrones, con el fin de lograr un pulido espejo.

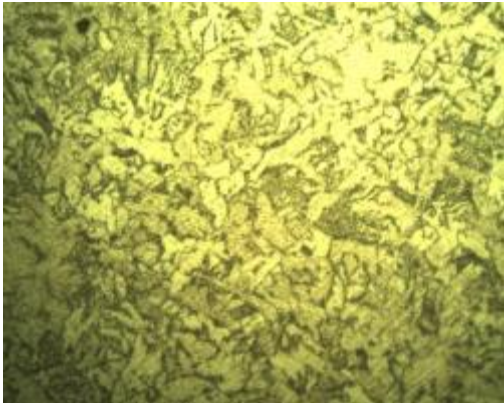
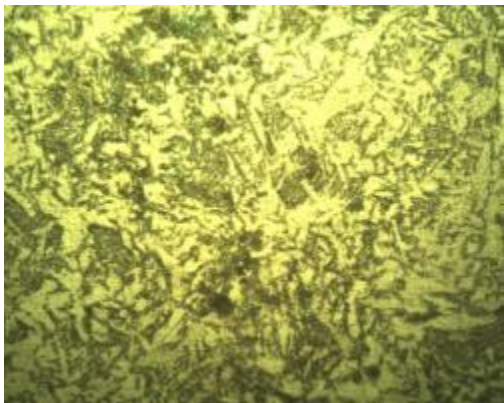
Figura 15. Empastilladora



Fuente: Autores. Universidad Libre, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Materiales

Se inicia la observación microscopia óptica convencional con un ataque químico de Nital al 3% de concentración durante aproximadamente 10 segundos y con aumentos de 50x, 100x, 200x, 500x y posteriormente 1000x entre las probetas en estado natural y la tratada térmicamente mediante normalizado; a continuación presentadas.

Tabla 5. Comparación Microestructural

COMPARACIÓN MICROESTRUCTURAL	
PROBETA ESTADO NATURAL	PROBETA NORMALIZADA
500x	500x
	

Fuente: Autores

Como resultado de la microscopia óptica convencional entre el material en estado natural y luego del tratamiento térmico de normalizado se observó una condición similar en su microestructura señalado en cada uno de los aumentos, desde 50x hasta 1000x, una microestructura provista de ferrita y perlita en su totalidad en ambos casos estudiados, esto con el fin de confirmar la condición micro estructural para obtener una muestra de la tubería propiamente dicha de acero ASTM A53 Gr. B.

Para la verificación de las propiedades mecánicas (Esfuerzo Ultimo) de la probeta en estado natural y tratado térmicamente(Normalizado), se somete la probeta a la Máquina de Ensayos Universal, con dimensiones establecidas en la Norma API 1104, mencionado anteriormente; cuyo resultado dio Esfuerzo Ultimo de 448 MPa y según especificaciones técnicas del fabricante es de 415 min MPa (60.000 PSI). Calculado de la siguiente manera, teniendo en cuenta únicamente el valor de la carga de rotura brindado por la Maquina de Ensayos Universal.

El área transversal es de 167,9 mm², y como resultado del ensayo la carga de rotura fue de 7.670 Kg dando como resultado un Esfuerzo Ultimo de 448 MPa.

$$F = m * g \quad \text{Ec.12.1}$$

$$F = 7.670 \text{ Kg} * 9,81 \frac{m}{s^2} = 75242,7 \text{ N}$$

$$\sigma u = \frac{F}{A} = \frac{75242,7 \text{ N}}{167,9 \text{ mm}^2} g \quad \text{Ec.12.2}$$

$$\sigma u = 448 \text{ Mpa}$$

$F = \text{Fuerza (N)}$

$g = \text{gravedad } 9,81 \text{ m/s}^2$

$m = \text{masa (Kg)}$

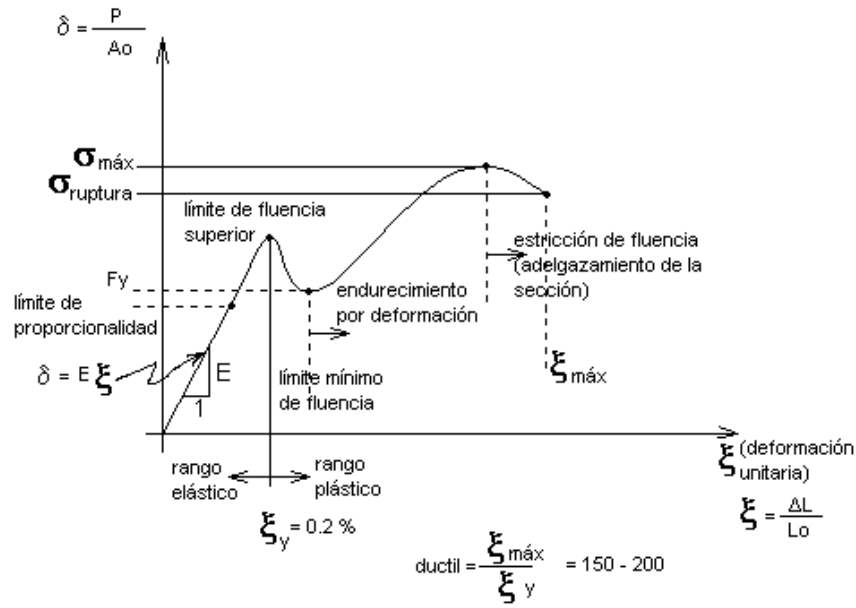
$\sigma u = \text{Esfuerzo ultimo Mpa}$

$A = \text{Area (mm}^2\text{)}$

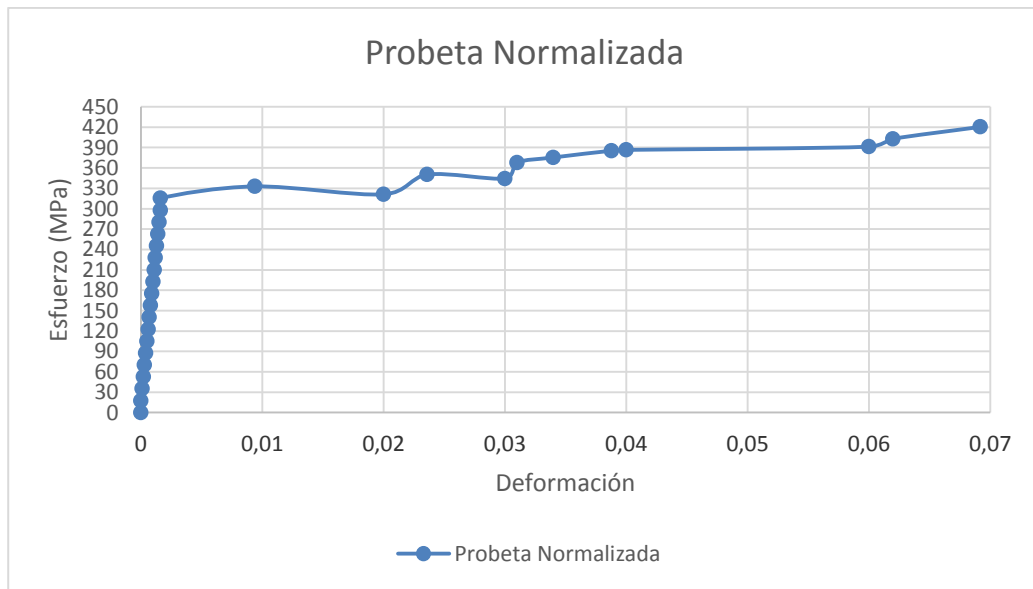
El esfuerzo de fluencia calculado con respecto a la curva Esfuerzo – Deformación, Figura 16, a un 0.2 % de deformación según lo especifica la literatura dio como resultado:

$$\sigma f = 316.2 \text{ Mpa} \quad \text{Ec.12.3}$$

Figura 16. Curva Esfuerzo-Deformación Acero - Probeta Normalizada



Fuente: Biblioteca Online Universidad Técnica Federico Santa María



Fuente: Autores

Tabla 6. Especificaciones Probeta Normalizada

Especificaciones Probeta					
Largo (mm)	50	Largo f (mm)	67	% Elongación	34
Ancho (mm)	24	Ancho f (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor f (mm)	4	% Reducción de Área	61,9047619
Área (mm ²)	168	Área final	64		

Fuente: Autores

Como resultado de la comparación del esfuerzo ultimo brindado por el fabricante y los analizados por la prueba de tensión realizada, podemos afirmar que según la figura 16 presenta un comportamiento referente a un material de bajo contenido de carbono, además de un porcentaje de elongación y reducción de área, datos en la tabla 6, acordes con los establecidos por el fabricante; según esto luego del proceso de corte de la tubería y el tratamiento térmico de normalizado las probetas no sufrieron cambio en su microestructura y sus propiedades mecánicas.

12.2. PRUEBA GRAVIMÉTRICA (PÉRDIDA DE MASA)

Después de la exposición de las muestras a cada uno de los medios asignados se realiza la comparación de masas antes y después de los ataques a los que fueron sometidos, diferencia de pesos a continuación presentada; de igual forma se calcula el porcentaje de pérdida de masa respecto a cada probeta y la relación de velocidad de corrosión, determinada por la siguiente ecuación prevista de la norma ASTM G1 – 90 en cada caso. Se toma como constante (K) un valor de $3,45 \times 10^6$ para que la relación este en mils por año (mpy), el tiempo de exposición es ajustado al tiempo asignado a cada ensayo (1,5, 3 y 4,5 hora), Se toma una densidad² de $7,85 \text{ gr/cm}^3$ para este acero y el área se considera sumando todas las superficies de la probeta, ya que toda la probeta estuvo en contacto con el ambiente corrosivo.

$$\text{Corrosion Rate} = (K \times W) / (A \times T \times D) \quad \text{Ec.1.1}$$

Dónde:

K = Constante

T = tiempo de exposición en horas.

A = Área en cm^2

W = Pérdida de masa en gramos

D = Densidad en g/cm^3

12.3. ATAQUE DE FLUIDOS EN ESTADO LIQUIDO

En mi primera medida se exponen las probetas de acero ASTM A53 Gr. B a Ácido Sulfúrico y Ácido Clorhídrico en estado líquido, con un tiempo de exposición de 1.5, 3 y 4.5 horas respectivamente. (Tolerancia de la Balanza Manual 0.1 gr).

Obteniendo resultados evidenciados en las tablas descritas a continuación:

Tabla 7. Pérdida de Masa Estado Líquido

ESTADO LIQUIDO					
H2SO4 - 97% concentración					
Tiempo =					1,5 hr
# PROBETA	Mi (gr)	Mf (gr)	Δ m (gr)	%	R. Corrosión (mpy)
1	300,6	300,3	0,3	0,099800399	512,9787566
2	270	269,8	0,2	0,074074074	341,9858377
3	268,9	268,7	0,2	0,074377092	341,9858377
H2SO4 - 97% concentración					
Tiempo =					3 hr
# PROBETA	Mi (gr)	Mf (gr)	Δ m (gr)	%	R. Corrosión
4	274,9	274,5	0,4	0,145507457	341,9858377
5	287,7	287,4	0,3	0,104275287	256,4893783
6	282,7	282,4	0,3	0,106119561	256,4893783
H2SO4 - 97% concentración					
Tiempo =					4,5 hr
# PROBETA	Mi (gr)	Mf (gr)	Δ m (gr)	%	R. Corrosión
7	267,1	266,5	0,6	0,224634968	341,9858377
8	284,3	283,6	0,7	0,246218783	398,9834773
9	285,2	284,6	0,6	0,210378682	341,9858377
ESTADO LIQUIDO					
HCL - 37% de concentración					
Tiempo (h) =					1,5 hr
# PROBETA	Mi (gr)	Mf (gr)	Δ m (gr)	% Δ m	R. Corrosión (mpy)
10	291,5	289,3	2,2	0,754716981	3761,844215
11	268,3	266,5	1,8	0,670890794	3077,872539
12	275,8	274,1	1,7	0,616388687	2906,879621
HCL - 37% de concentración					
Tiempo (h) =					3 hr
# PROBETA	Mi (gr)	Mf (gr)	Δ m (gr)	% Δ m	R. Corrosión (mpy)
16	282,8	281	1,8	0,636492221	1538,93627
17	287,4	285,6	1,8	0,626304802	1538,93627
18	282,4	280,5	1,9	0,672804533	1624,432729
HCL - 37% de concentración					
Tiempo (h) =					4,5 hr
# PROBETA	Mi (gr)	Mf (gr)	Δ m (gr)	% Δ m	R. Corrosión (mpy)
13	295,5	293,7	1,8	0,609137056	1025,957513
14	275,7	273,5	2,2	0,797968807	1253,948072
15	261,2	259,3	1,9	0,727411945	1082,955153

Fuente: Autores

Según los resultados obtenidos de la exposición a Ácido sulfúrico en estado líquido como se evidencia en la tabla 7, la pérdida de masa (%) después del ataque presento un aumento gradual proporcional al tiempo de exposición, sin embargo su pérdida de masa no es significativa al considerar que el acero ASTM A53 Gr. B deriva una película auto protectora de sulfuro de hierro esto permite que no sea susceptible a este acido.

Al evaluar los resultados obtenidos de la exposición a Ácido Clorhídrico en estado líquido evidenciados en la tabla 7, la pérdida de masa (%) después del ataque presento una pérdida constante al tiempo de exposición y considerable debido a que su pérdida de masa indico valores cercanos a 1%, esto indica que el acero ASTM A53 Gr. B es más susceptible al ataque de este acido.

12.4. ATAQUE DE FLUIDOS EN ESTADO VAPOR

Posteriormente se exponen las probetas de acero ASTM A53 Gr. B a Ácido Sulfúrico y Ácido Clorhídrico en estado vapor siendo esta prueba de mayor importancia debido a que se asemeja a la condición a la cual va a estar expuesta en una planta geotérmica, durante un tiempo de exposición de 1.5, 3 y 4.5 horas respectivamente, teniendo en cuenta el inicio de la prueba al estar en total contacto con el vapor del ácido. Obteniendo resultados evidenciados en las tablas descritas a continuación:

Tabla 8. Pérdida de Masa Estado Vapor

ESTADO VAPOR					
H2SO4 - Dilución 5 MOLAR / Temperatura del vapor: 48°C					
Tiempo (h) =					1,5
# PROBETA	Mi (gr)	Mf (gr)	Δm (gr)	% Δm	R. Corrosión
36	284	283,9	0,1	0,035211268	170,9929189
35	283,7	283,6	0,1	0,035248502	170,9929189
34	281,3	281,2	0,1	0,035549236	170,9929189
H2SO4 - Dilución 5 MOLAR / Temperatura del vapor : 48°C					
Tiempo (h) =					3
# PROBETA	Mi (gr)	Mf (gr)	Δm (gr)	% Δm	R. Corrosión
33	301,9	301,7	0,2	0,066247102	170,9929189
32	281,6	281,5	0,1	0,035511364	85,49645943
31	280,7	280,6	0,1	0,035625223	85,49645943
H2SO4 - Dilución 5 MOLAR / Temperatura del vapor : 48°C					
Tiempo (h) =					4,5
# PROBETA	Mi (gr)	Mf (gr)	Δm (gr)	% Δm	R. Corrosión
30	299,2	299	0,2	0,06684492	113,9952792
29	296	295,9	0,1	0,033783784	56,99763962
28	282,3	282,1	0,2	0,070846617	113,9952792
ESTADO VAPOR					
HCL - Dilución 5 MOLAR / Temperatura: 60°C					
Tiempo (h) =					1,5
# PROBETA	Mi (gr)	Mf (gr)	Δm (gr)	% Δm	R. Corrosión (mpy)
19	280	279,5	0,5	0,178571429	854,9645943
20	279,6	279,4	0,2	0,071530758	341,9858377
21	280,7	280,3	0,4	0,142500891	683,9716754
HCL - Dilución 5 MOLAR / Temperatura: 60°C					
Tiempo (h) =					3
# PROBETA	Mi (gr)	Mf (gr)	Δm (gr)	% Δm	R. Corrosión (mpy)
22	281,9	281,1	0,8	0,283788578	683,9716754
23	280,7	279,8	0,9	0,320627004	769,4681349
24	281,5	280,7	0,8	0,284191829	683,9716754
HCL - Dilución 5 MOLAR / Temperatura: 60°C					
Tiempo (h) =					4,5
# PROBETA	Mi (gr)	Mf (gr)	Δm (gr)	% Δm	R. Corrosión (mpy)
25	282	280,1	1,9	0,673758865	1082,955153
26	272,3	270,2	2,1	0,771208226	1196,950432
27	278,5	276,2	2,3	0,825852783	1310,945711

Fuente: Autores

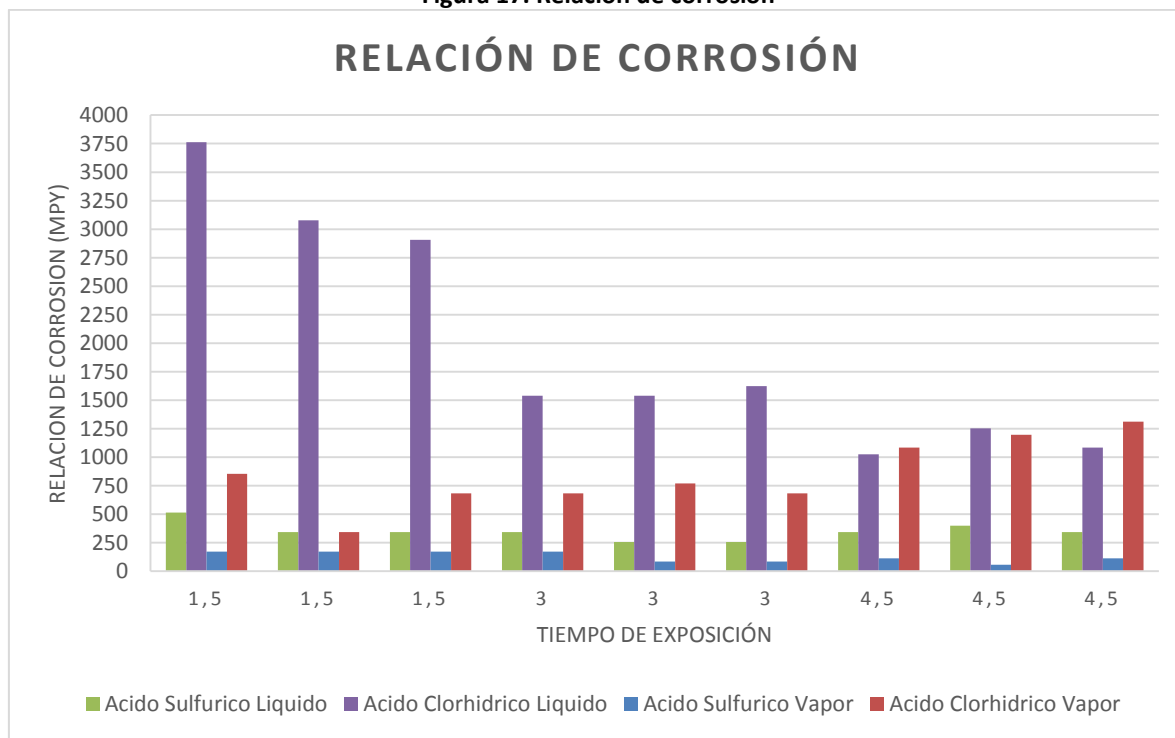
En los datos obtenidos por la exposición del acero ASTM A53 Gr. B a Ácido sulfúrico en estado vapor evidenciados en la tabla 8, se determina que en el ataque la pérdida de masa (%) se presentó constante durante el tiempo de exposición, sin embargo su pérdida de masa no es significativa debido a que la concentración del ácido no es tan alta para generar una condición lo suficientemente agresiva para generar una pérdida de masa representativa.

Analizando los resultados obtenidos de la exposición a Ácido Clorhídrico en estado vapor evidenciados en la tabla 8, la pérdida de masa (%) después del ataque presento una pérdida exponencial al tiempo de exposición y considerable debido a que su pérdida de masa indico valores cercanos a 1%, esto indica que el acero ASTM A53 Gr. B es más susceptible al ataque de este ácido y aún más a mayor tiempo de exposición.

12.5. RELACIÓN DE CORROSIÓN

En la figura 17, se observa la relación de corrosión que presentaron las probetas en cada uno de los tiempos de exposición en ambos ácidos a estados líquido y vapor, en donde se identificó una mayor cantidad de corrosión en la exposición a ácido clorhídrico en estado líquido a 1.5 horas, disminuyendo a medida que aumenta el tiempo de exposición (fue menor en estado vapor), caso contrario fue con el ácido sulfúrico en estado líquido y vapor el cual presento una cantidad de corrosión posiblemente estable sin tener en cuenta el tiempo de exposición

Figura 17. Relación de corrosión



Fuente: Autores

12.6. METALOGRAFÍA

Para realizar la técnica de microscopía óptica convencional se realiza el mismo proceso de preparación de las probetas anteriormente nombrado; estas se disponen de a 3 muestras por baquelita teniendo en cuenta que se extraen de las probetas originales y de dimensiones aproximadamente 5mm X 5mm; organizadas de tal forma que las tres probetas tengan las mismas características y su posición sea la misma respecto a la posición del tubo original para poder determinar el avance de la corrosión de la zona interna y de la zona externa. Posteriormente se realiza la metalografía con aumentos de 50x, 100x, 200x y 500x.

A continuación se presenta el comportamiento de las probetas metalográficamente para cada una de las variables en aumentos de 200x y el material después de ser tratado térmicamente mediante normalizado.

En la figura 18 y 19 se muestra el principal tipo de corrosión encontrado en esta prueba denominada pitting al exponer este material a ácido sulfúrico en estado líquido, presentando un aumentando gradual con respecto al tiempo, en donde la altura de este tipo de corrosión es mayor en la superficie externa que en la interna del material a estas condiciones.

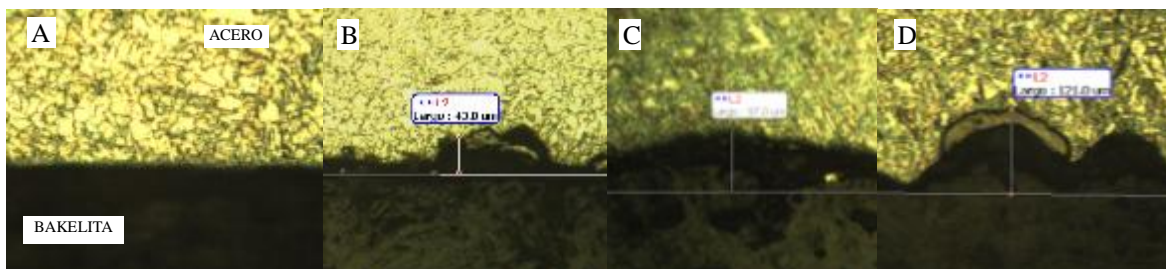


Figura 18. A. Muestra Metalográfica en estado natural. Probetas sometidas a Ácido sulfúrico en estado líquido vistas de la parte externa de la tubería del material. B. Tiempo de 1,5 horas. C. Tiempo de 3 horas. D. Tiempo de 4,5 horas.



Figura 19. A. Muestra Metalográfica en estado natural. Probetas sometidas a ácido sulfúrico en estado líquido vistas de la parte interna de la tubería del material. B. Tiempo de 1,5 horas. C. Tiempo de 3 horas. D. Tiempo de 4,5 horas.

Las figuras 20 y 21 muestran las probetas expuestas a ácido sulfúrico en estado vapor y se puede observar un comportamiento uniforme en las alturas de las picaduras en el material durante los tres tiempos tomados en consideración. Revelando mayor

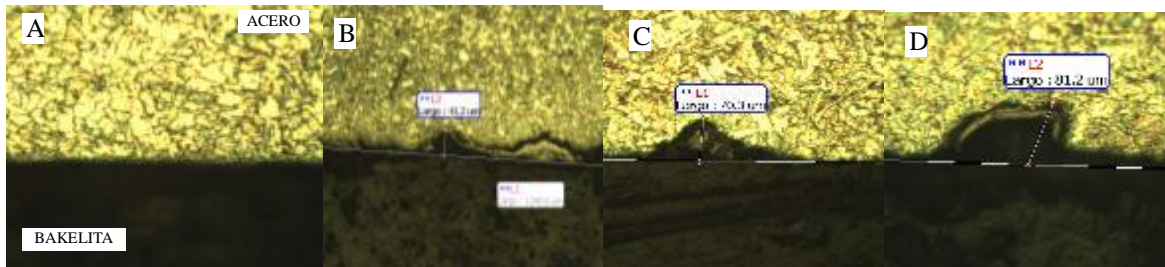


Figura 20. A. Muestra Metalográfica en estado natural. Probetas sometidas a ácido sulfúrico en estado vapor vistas de la parte Externa de la tubería del material. B. Tiempo de 1,5 horas. C. Tiempo de 3 horas. D. Tiempo de 4,5 horas.

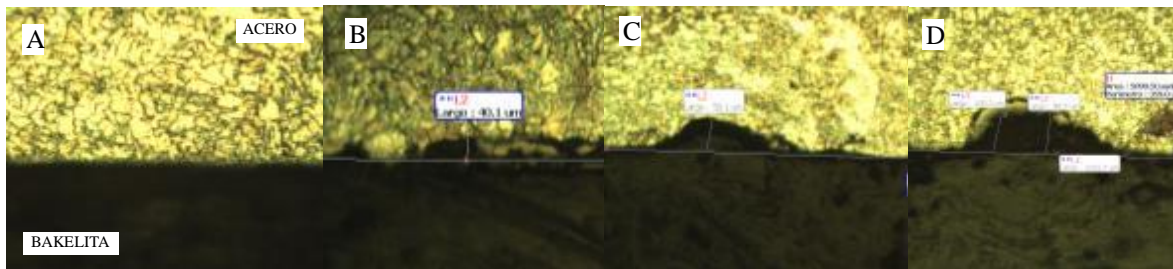


Figura 21 A. Muestra Metalográfica en estado natural. Probetas sometidas a ácido sulfúrico en estado vapor vistas de la parte Interna de la tubería del material. B. Tiempo de 1,5 horas. C. Tiempo de 3 horas. D. Tiempo de 4,5 horas.

La figura 22 y 23 muestra el comportamiento de la superficie del material expuesto a ácido clorhídrico en estado líquido y se puede observar el comportamiento de la corrosión de forma constante durante los tres tiempos, presentando mayor pérdida de material en la parte externa de la tubería que en la interna.

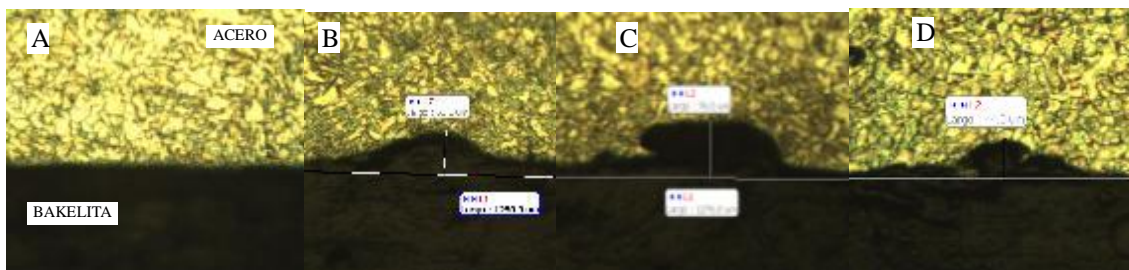


Figura 22. Muestra Metalográfica en estado natural. Probetas sometidas a ácido clorhídrico en estado líquido vistas de la parte Externa de la tubería del material. B. Tiempo de 1,5 horas. C. Tiempo de 3 horas. D. Tiempo de 4,5 horas.

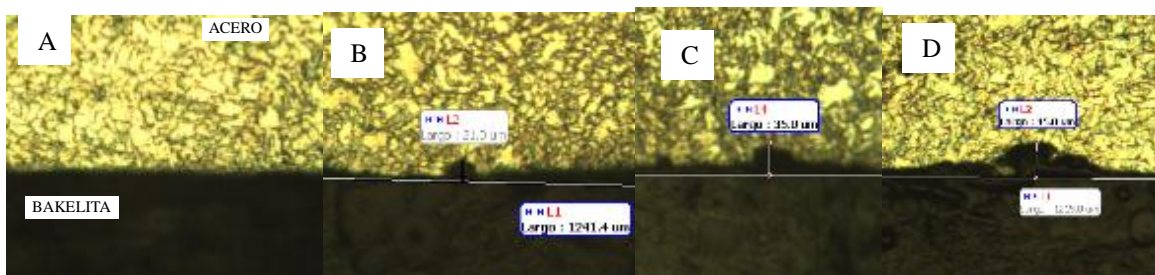


Figura. 23. Muestra Metalográfica en estado natural. Probetas sometidas a ácido clorhídrico en estado líquido vistas de la parte Interna de la tubería del material. B. Tiempo de 1,5 horas. C. Tiempo de 3 horas. D. Tiempo de 4,5 horas.

En la figura 24 y 25 se logra observar que la cantidad de corrosión en presencia de vapor sobre el material es mayor en la parte externa que en la interna, aumentando gradualmente entre cada intervalo de tiempo en la parte externa mientras que en la altura en las picaduras encontradas presentan valores sin variación.

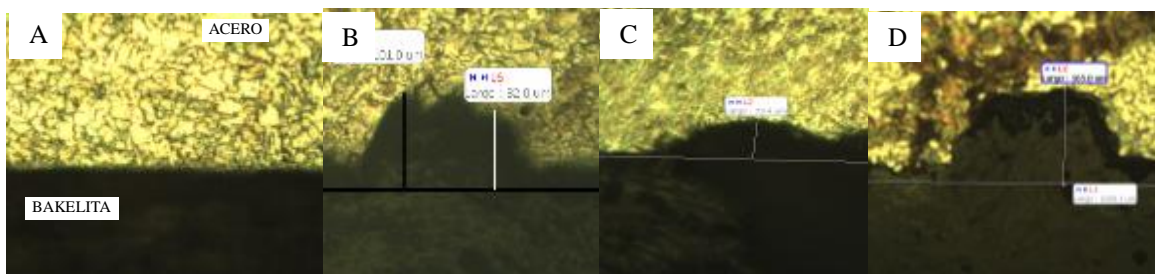


Figura. 24. Muestra Metalográfica en estado natural. Probetas sometidas a ácido clorhídrico en estado vapor vistas de la parte Externa de la tubería del material. B. Tiempo de 1,5 horas. C. Tiempo de 3 horas. D. Tiempo de 4,5 horas.

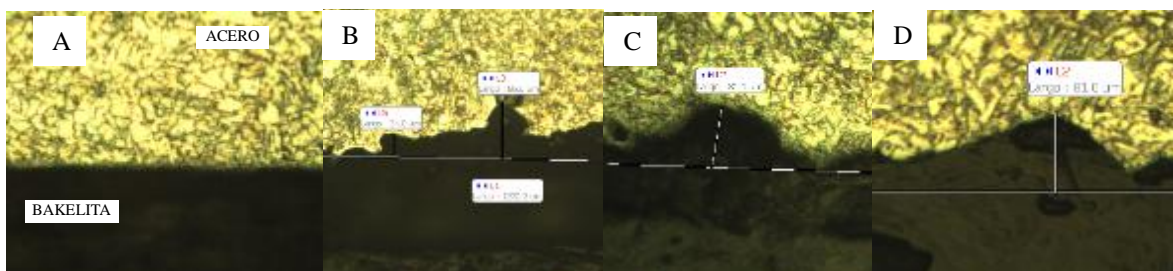


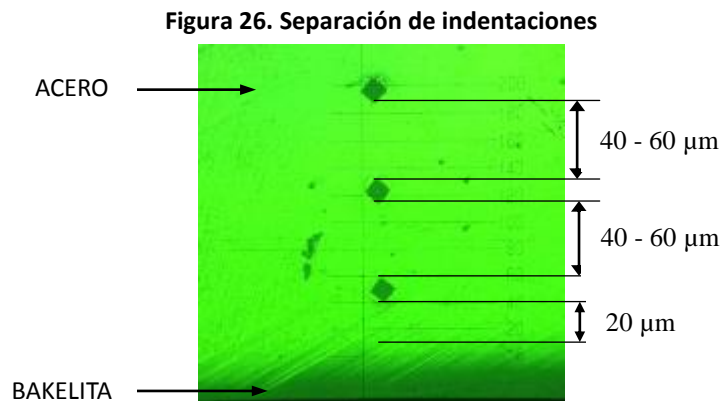
Figura 25. A. Muestra Metalográfica en estado natural. Probetas sometidas a ácido clorhídrico en estado vapor vistas de la parte interna de la tubería del material. B. Tiempo de 1,5 horas. C. Tiempo de 3 horas. D. Tiempo de 4,5 horas.

12.7. MICRODUREZA

En las pruebas de Microdureza fueron realizadas utilizando un indentador Vickers sobre la sección transversal de la probeta expuesta previamente a la acción de los ácidos, con cargas variadas con el fin de determinar la carga que menor variación en mediciones arrojaba y que no generara agrietamiento alrededor de la huella.

Se tomó un perfil de dureza de 7 indentaciones a lo ancho de la probeta, tres en sentido cóncavo externo hacia el medio, una en medio y de igual manera tres en sentido cóncavo interno hacia el medio, con una separación de indentaciones como lo muestra la figura 26, con el fin de evaluar el perfil de dureza del ancho de la probeta comparado con una probeta patrón sin ataque corrosivo, identificando la variación de la dureza desde la superficie externa a la superficie interna de la tubería de acero ASTM A53 Gr. B.

Se usó una carga de 300 gr, debido a que fue la que menor variación en la medición y en la huella presento, durante un lapso de 15 segundos de tal manera que la huella fuera totalmente definida y no generara agrietamiento alrededor de la misma.



Fuente: Autores.

A continuación se presentan las gráficas de los perfiles de dureza de las 36 probetas previamente expuestas a Ácido Clorhídrico y Ácido Sulfúrico en estado líquido y vapor, comparándose el comportamiento de las probetas que fueron sometidas con una probeta patrón sin exposición a dichos ácidos.

Las tablas con la información detallada contenida en cada grafica de los perfiles de dureza se encuentran en el Anexo1.

Las 7 indentaciones realizadas al ancho de cada probeta, fueron identificadas de la siguiente manera:

Tabla 9. Identificación de Indentaciones

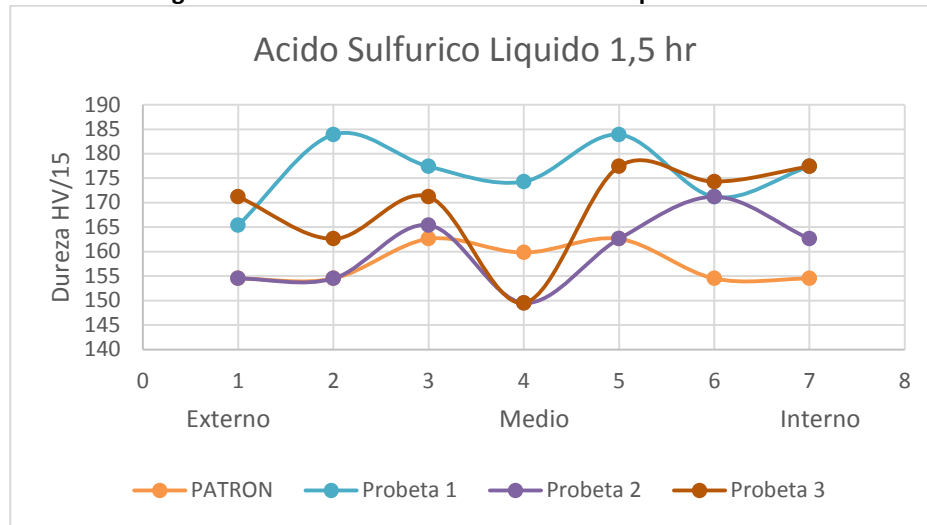
PROBETA	ZONA		IDENTIFICACIÓN
	EXTERNA	E1	1
		E2	2
		E3	3
	MEDIA	M	4
	INTERNA	I3	5
		I2	6
		I1	7

Fuente: Autores

12.7.1. PERFIL DE DUREZA ÁCIDO SULFÚRICO

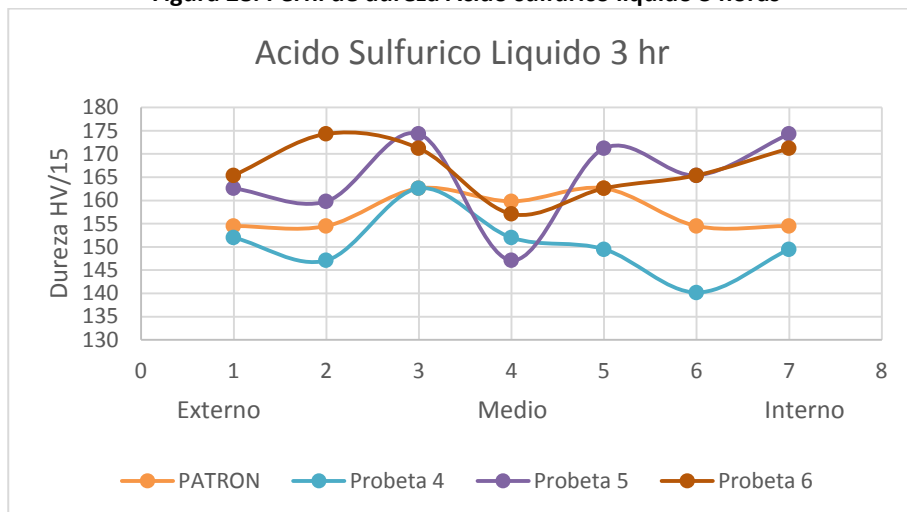
12.7.1.1. ESTADO LIQUIDO

Figura 27. Perfil de dureza Ácido sulfúrico liquido 1.5 horas



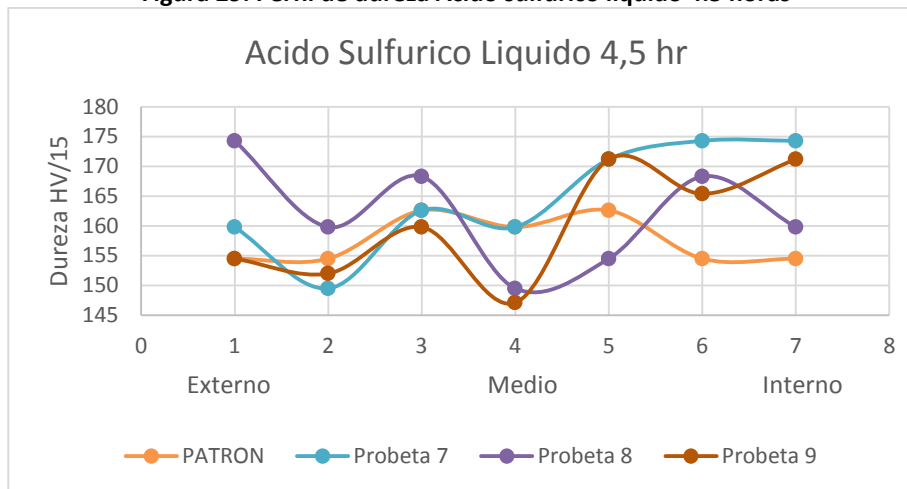
Fuente: Autores.

Figura 28. Perfil de dureza Ácido sulfúrico líquido 3 horas



Fuente: Autores.

Figura 29. Perfil de dureza Ácido sulfúrico líquido 4.5 horas



Fuente: Autores.

Según los datos obtenidos al medir el tamaño de la huella y hacer el respectivo cálculo de dureza en cada zona de la probeta, se obtuvo el perfil de dureza luego de la exposición a Ácido Sulfúrico en estado líquido a 1.5 horas, 3 horas y 4.5 horas en el acero ASTM A53 Gr. B indicado en las figuras 27, 28 y 29, por lo cual nos indica una menor dureza en la zona media de la probeta y un aumento en la zona superficial, suponiendo que el fenómeno de corrosión presente endurecimiento superficial debido a los precipitados formados por la corrosión debido a la acción del Ácido Sulfúrico.

12.7.1.2. ESTADO VAPOR

Figura 30. Perfil de dureza Ácido sulfúrico Vapor 1.5 horas

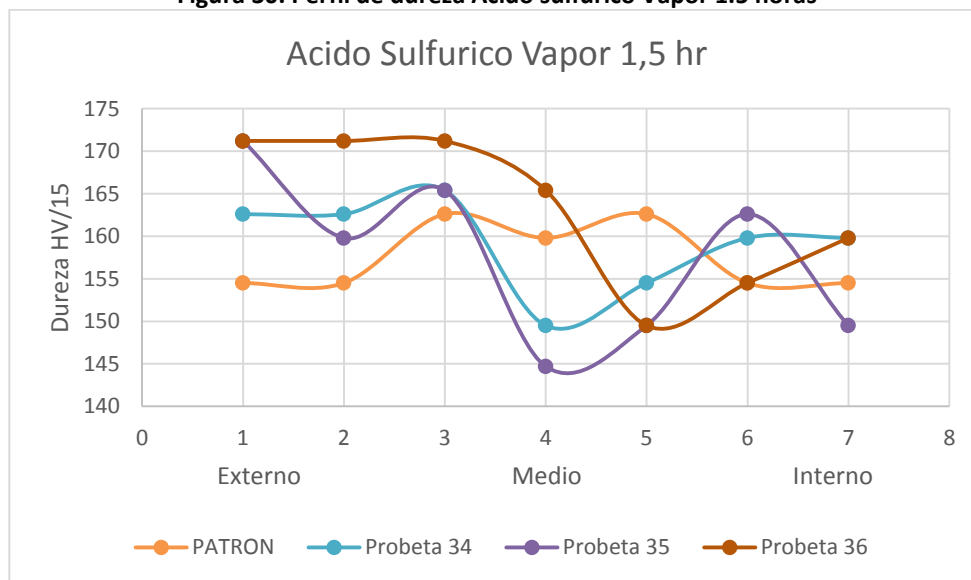


Figura 31. Perfil de dureza Ácido sulfúrico Vapor 3 horas

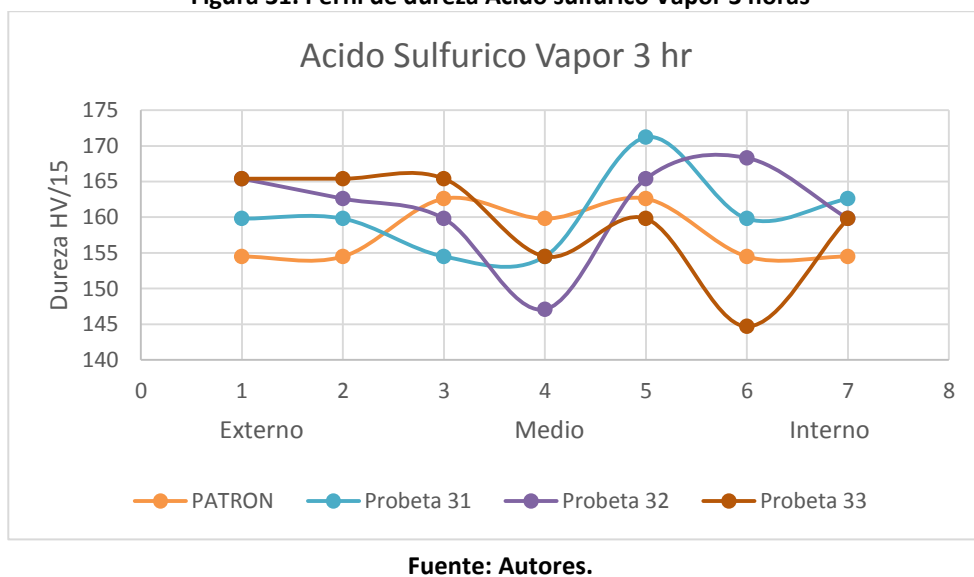
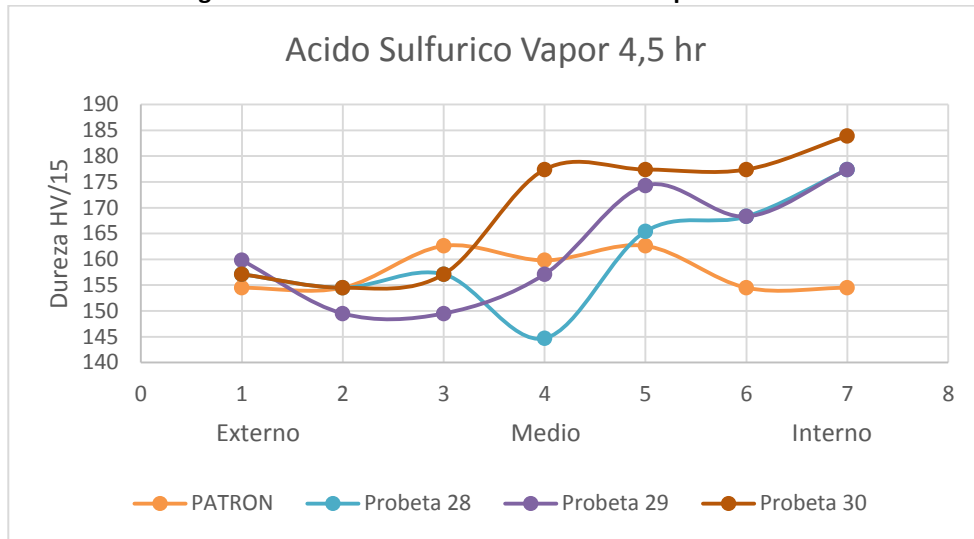


Figura 32. Perfil de dureza Ácido sulfúrico Vapor 4.5 horas



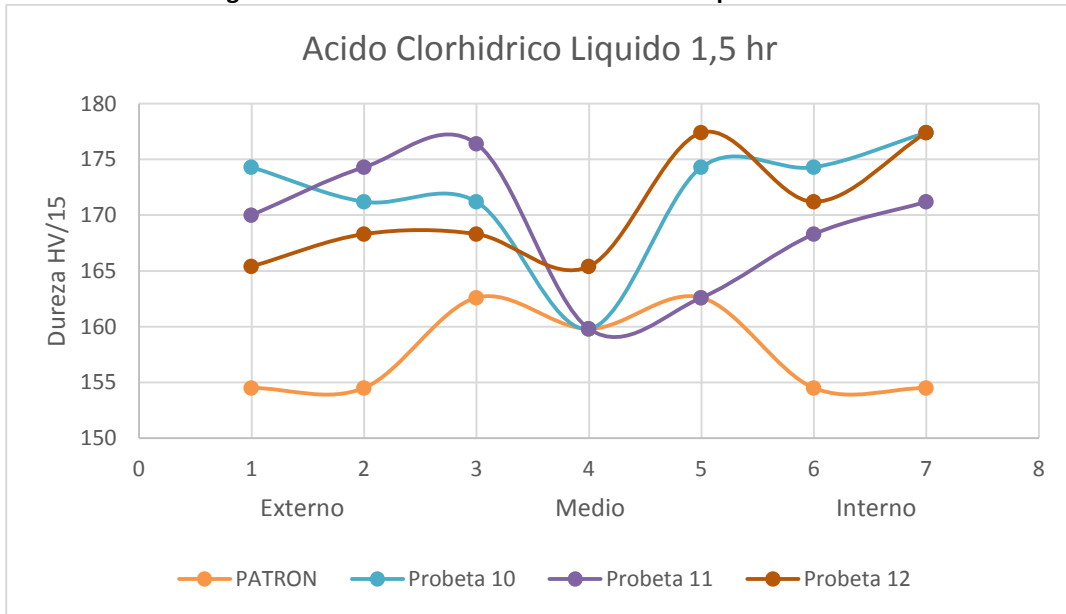
Fuente: Autores.

A partir de los datos obtenidos de Microdureza después de ser expuestas las muestras a ácido sulfúrico en estado de vapor a 1.5 horas, 3 horas y 4.5 horas, se obtuvo el perfil de dureza mostrado en las figuras 30, 31 y 32; se observó un aumento de dureza en la zona externa e internamente presentaron una mínima variación en las probetas de menor tiempo de exposición y la de 4,5 horas mostro un aumento en su dureza superficialmente, esto debido al fenómeno de corrosión presentando endurecimiento superficial debido a los precipitados formados por la corrosión debido a la acción del Ácido Sulfúrico, suponiendo aumento de su fragilidad.

12.7.2. PERFIL DE DUREZA ÁCIDO CLORHÍDRICO

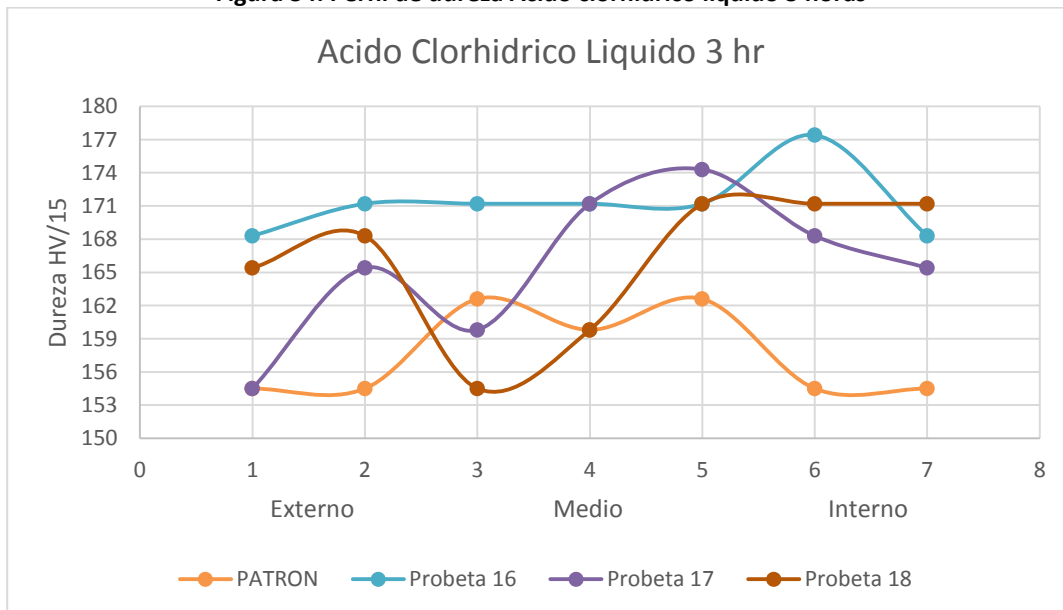
12.7.2.1. ESTADO LIQUIDO

Figura 33. Perfil de dureza Ácido clorhídrico liquido 1.5 horas



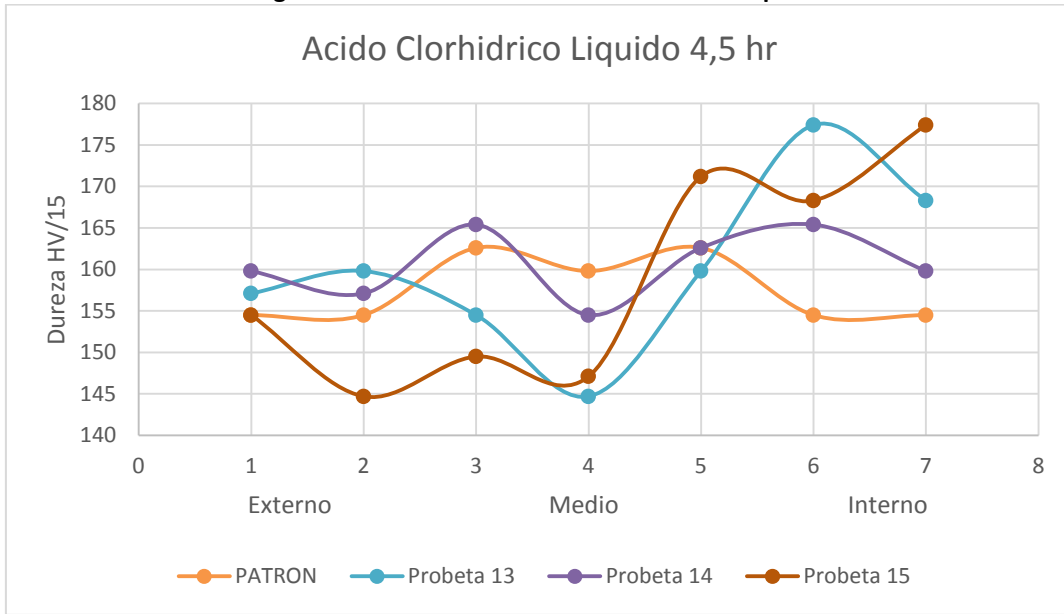
Fuente: Autores.

Figura 34. Perfil de dureza Ácido clorhídrico liquido 3 horas



Fuente: Autores.

Figura 35. Perfil de dureza Ácido clorhídrico liquido 4.5 horas

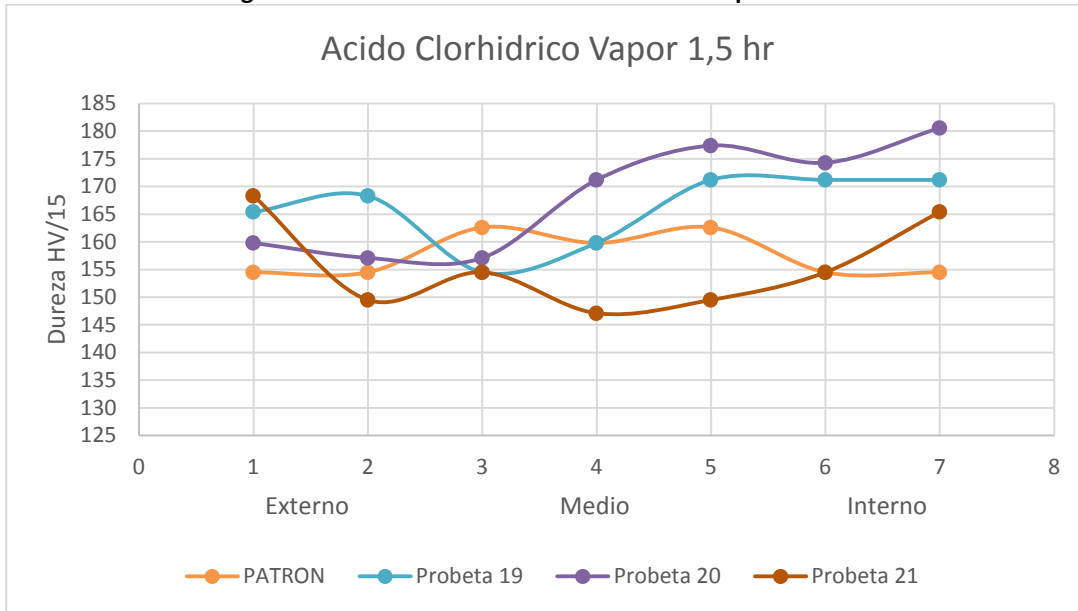


Fuente: Autores.

A partir de los datos obtenidos de Microdureza después de ser expuestas las muestras a Ácido Clorhídrico en estado de vapor a 1.5 horas, 3 horas y 4.5 horas, se obtuvo el perfil de dureza mostrado en las figuras 33, 34 y 35; se observó un posible endurecimiento en la zona superficial en las probetas debido al fenómeno de corrosión y por tanto se determinó que el ambiente corrosivo en el que fue expuesto el material generó un posible aumento de fragilidad superficialmente y una mínima variación en la parte media de la probeta.

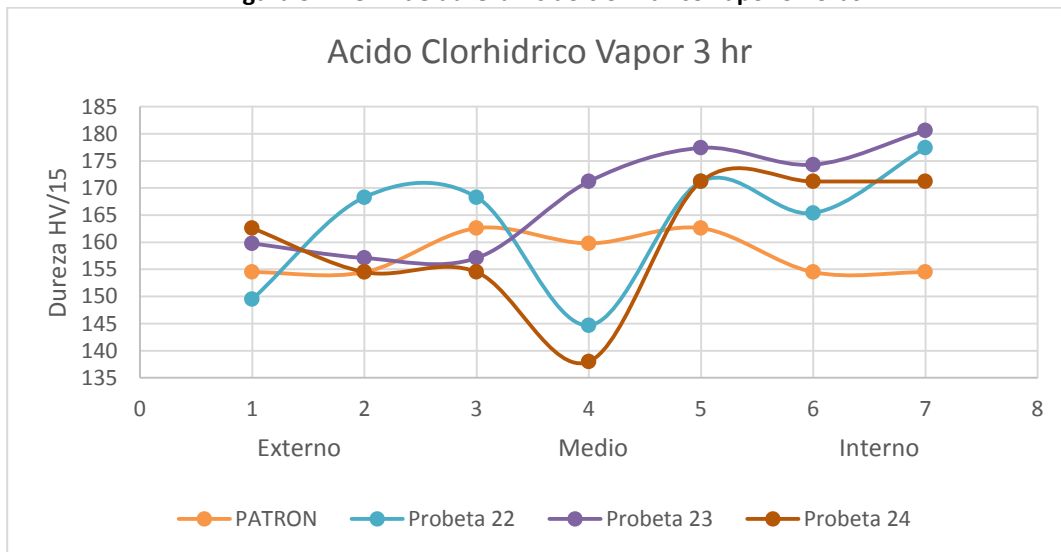
12.7.2.2. ESTADO VAPOR

Figura 36. Perfil de dureza Ácido clorhídrico vapor 1.5 horas



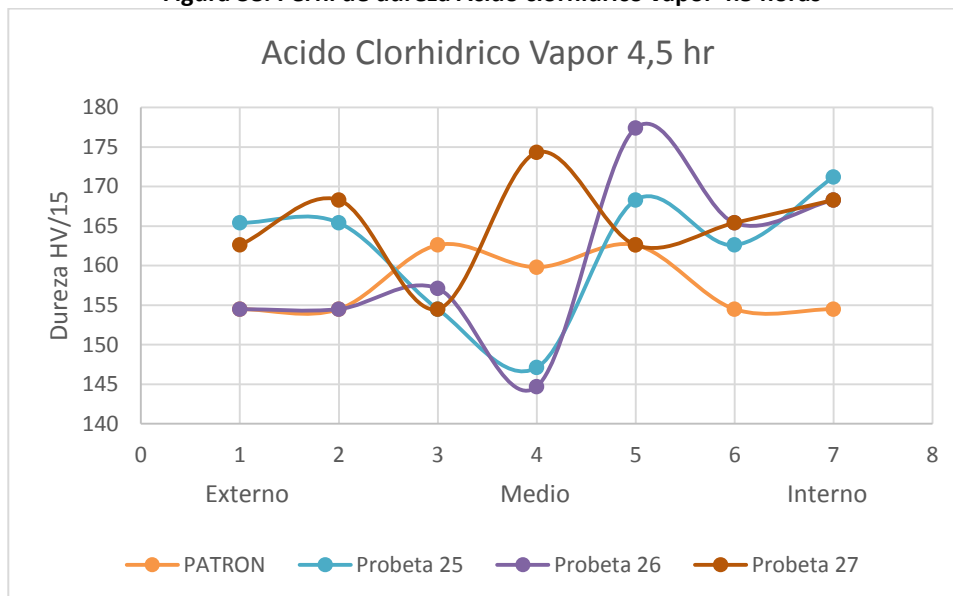
Fuente: Autores.

Figura 37. Perfil de dureza Ácido clorhídrico vapor 3 horas



Fuente: Autores.

Figura 38. Perfil de dureza Ácido clorhídrico vapor 4.5 horas



Fuente: Autores.

En las figuras 36, 37 y 38, se muestran los datos obtenidos de Microdureza de las probetas después de ser expuestas a ácido clorhídrico en estado de vapor a 1.5 horas, 3 horas y 4.5 horas y se obtuvo el perfil en donde se puede observar un endurecimiento en la zona superficial e interna de todas las probetas, debido al fenómeno de corrosión producido por la exposición en este medio generando un posible aumentando de su fragilidad.

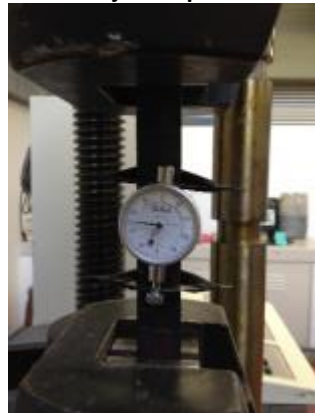
Suponiendo así que el fenómeno de corrosión presente un endurecimiento superficial del material debido a los precipitados formados por la corrosión debido a la acción de los ácidos, esto comparado con la probeta patrón (sin exposición a ácidos corrosivos), evidenciando aumento de dureza en la exposición a Ácido Clorhídrico en estado líquido y vapor que en Ácido Sulfúrico como se describe anteriormente.

12.8. TENSIÓN

En este ensayo se analiza el comportamiento del acero al ser sometido a un esfuerzo de tensión uniaxial y se realiza mediante la máquina de ensayos universal marca SHIMADZU Ref. UH-50A, ubicado en los laboratorios de la universidad libre.

Sometiendo una probeta estandarizada por la norma API 1104 a una carga uniaxial gradualmente creciente y estática hasta que ocurra la falla del material. Iniciando con la preparación de cada una de las probetas, mediante el dimensionamiento de las probetas y una marcación de a 1 cm en toda la longitud de la probeta para realizar la comparación entre las longitudes de la probeta, se utilizó un comparador de caratula para medir la deformación en la probeta causada por la aplicación de la carga, como se muestra en la figura 39, esta medición estaba limitada para ser tomada en la zona de fluencia sin conocer datos en la zona plástica, debido a la protección del equipo, por este motivo se realizó el análisis teniendo en cuenta el esfuerzo de fluencia pero sin embargo se calculó el esfuerzo último, dato que la maquina suministra.

Figura 39. Montaje comparador de caratula



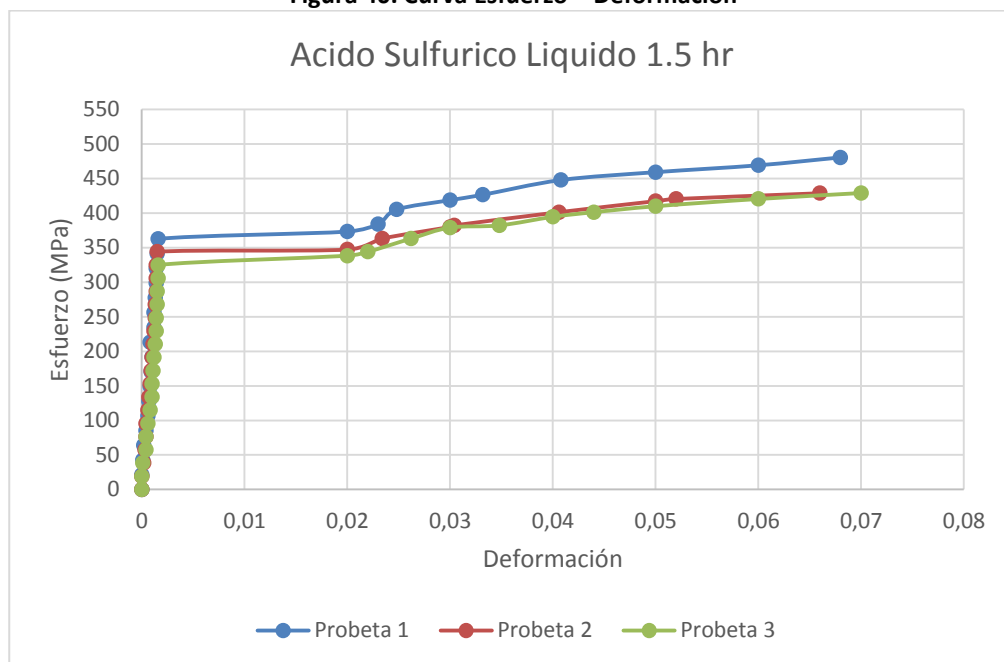
Fuente: Autores. Universidad Libre, Facultad de Ingeniera, Laboratorio de ensayos mecánicos.

Además se realizó la evaluación de la condición de la probeta enseguida del ensayo, calculando porcentaje de elongación, reducción de área, esfuerzo último y esfuerzo de fluencia.

A continuación se realiza la disposición del ensayo en las mordazas de la maquina junto con el extensómetro de la siguiente manera

Los resultados obtenidos mediante este ensayo son:

Figura 40. Curva Esfuerzo – Deformación



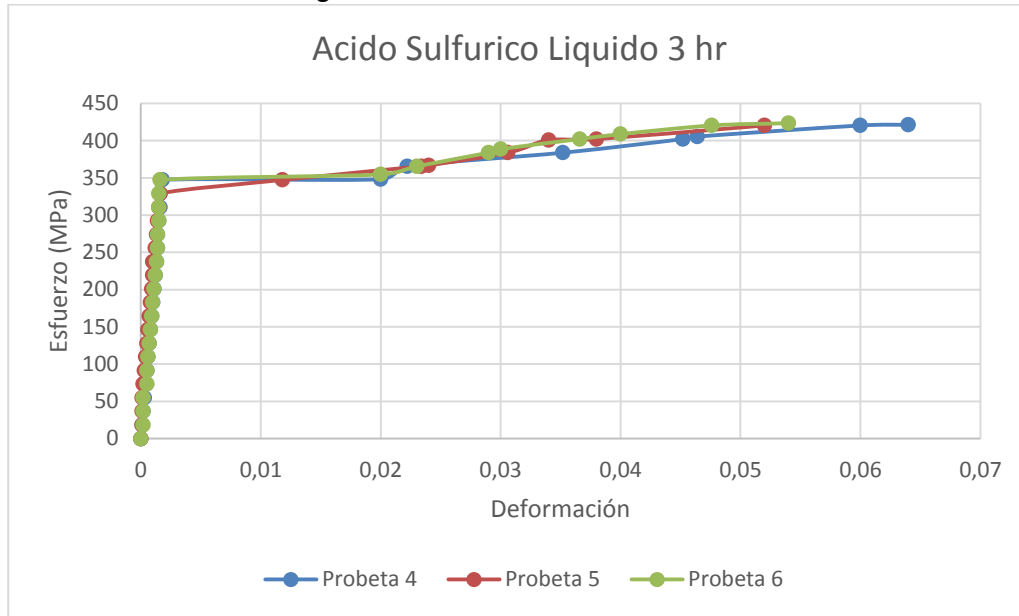
Fuente: Autores.

Tabla 10. Especificaciones Probetas

Especificaciones Probeta 1					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	66	% Elongación	32
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	17		
Espesor (mm)	6	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	50,725
Área (mm2)	138	Área Final (mm2)	68		
Carga Máxima (Kg)	7714	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		548,365	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		362,7	
Especificaciones Probeta 2					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	69	% Elongación	38
Ancho (mm)	22	Ancho final (mm)	15		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3,5	% Reducción de área	65,909
Área (mm2)	154	Área Final	52,5		
Carga Máxima (Kg)	7265	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		462,790	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		344,2	
Especificaciones Probeta 3					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	67	% Elongación	34
Ancho (mm)	22	Ancho final (mm)	15		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	61,039
Área (mm2)	154	Área Final	60		
Carga Máxima (Kg)	7120	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		453,553	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		325,2	

Fuente: Autores.

Figura 41. Curva Esfuerzo – Deformación



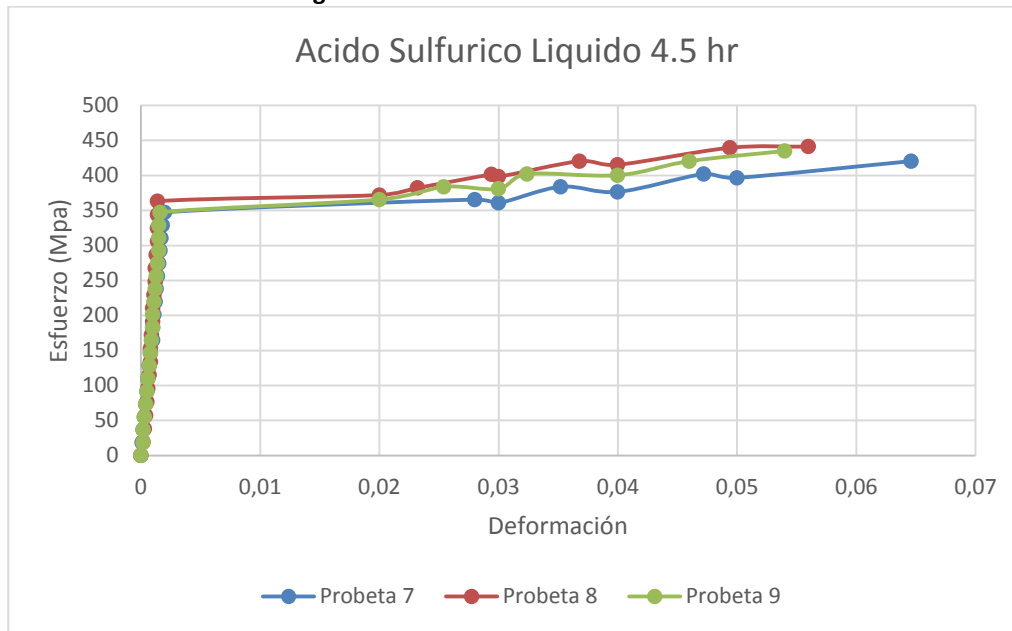
Fuente: Autores.

Tabla 11. Especificaciones Probetas

Especificaciones Probeta 4					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	61	% Elongación	22
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3	% Reducción de área	70,19
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	48		
Carga Máxima (Kg)	7670	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		467,35	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		347,32	
Especificaciones Probeta 5					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	66	% Elongación	32
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3,5	% Reducción de área	65,22
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	56		
Carga Máxima (Kg)	7790	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		474,66	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		329,8	
Especificaciones Probeta 6					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	63	% Elongación	26
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	15		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3,5	% Reducción de área	67,4
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	52,5		
Carga Máxima (Kg)	7825	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		476,79	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		347,5	

Fuente: Autores.

Figura 42. Curva Esfuerzo – Deformación



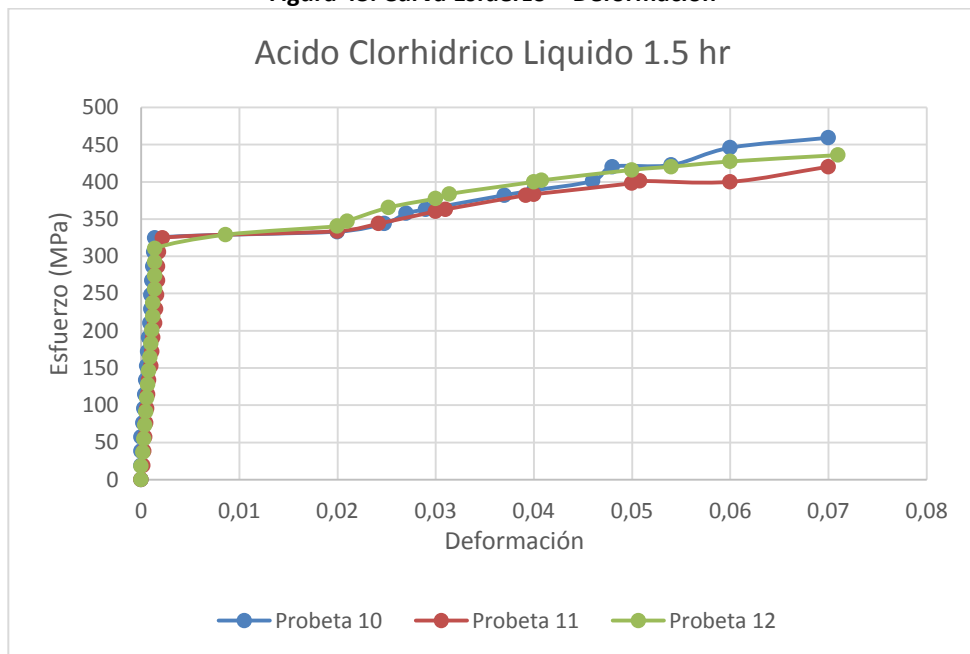
Fuente: Autores.

Tabla 12. Especificaciones Probetas

Especificaciones Probeta 7					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	66	% Elongación	32
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	15		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	62,73
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	60		
Carga Máxima (Kg)	7335	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		446,93	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		347,31	
Especificaciones Probeta 8					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	68	% Elongación	36
Ancho (mm)	22	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3,5	% Reducción de área	63,64
Área (mm2)	154	Área Final (mm2)	56		
Carga Máxima (Kg)	7635	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		486,36	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		363,40	
Especificaciones Probeta 9					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	67	% Elongación	34
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3	% Reducción de área	70,19
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	48		
Carga Máxima (Kg)	7845	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		478,01	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		347,70	

Fuente: Autores.

Figura 43. Curva Esfuerzo – Deformación



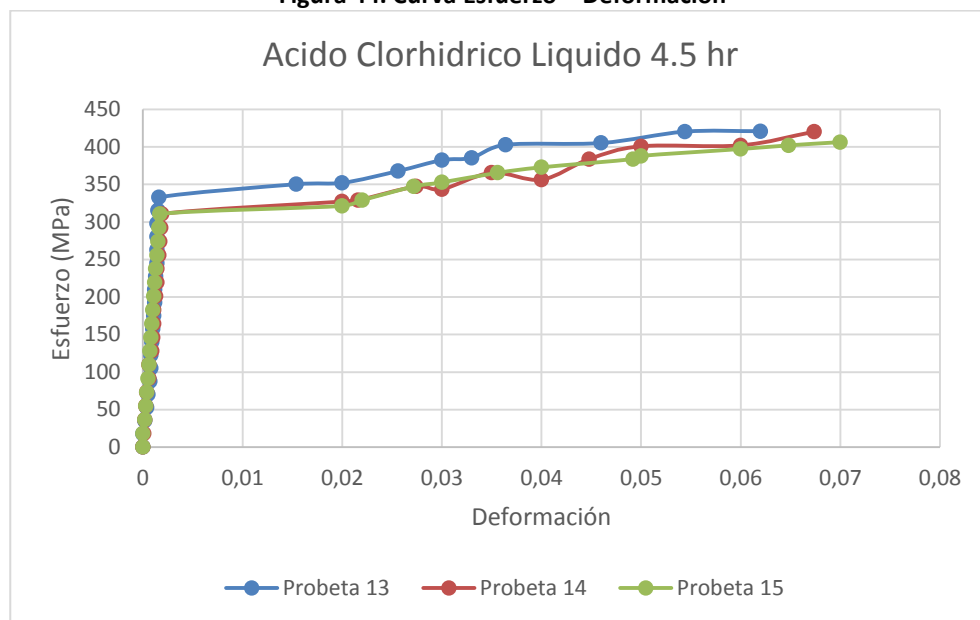
Fuente: Autores.

Tabla 13. Especificaciones Probetas

Especificaciones Probeta 10					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	61	% Elongación	22
Ancho (mm)	22	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	58,44
Área (mm2)	154	Área Final (mm2)	64		
Carga Máxima (Kg)	8215	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		523,31	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		325,14	
Especificaciones Probeta 11					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	68	% Elongación	36
Ancho (mm)	22	Ancho final (mm)	15		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3	% Reducción de área	70,78
Área (mm2)	154	Área Final (mm2)	45		
Carga Máxima (Kg)	7010	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		446,55	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		315,30	
Especificaciones Probeta 12					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	60	% Elongación	20
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	60,25
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	64		
Carga Máxima (Kg)	7450	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		453,94	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		312,30	

Fuente: Autores.

Figura 44. Curva Esfuerzo – Deformación



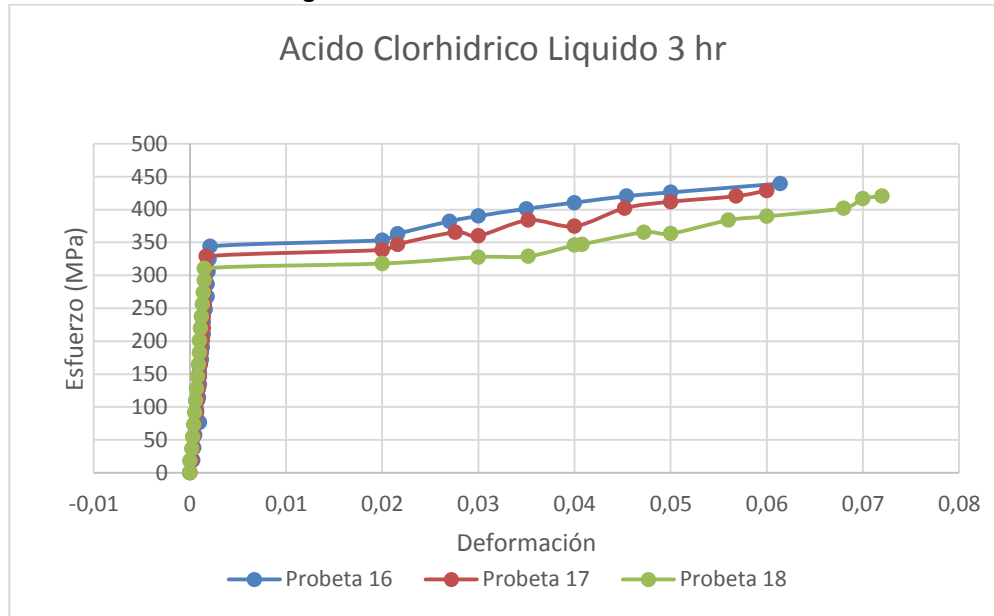
Fuente: Autores.

Tabla 14. Especificaciones Probetas

Especificaciones Probeta 13					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	66	% Elongación	32
Ancho (mm)	24	Ancho final (mm)	17		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3,5	% Reducción de área	64,58
Área (mm2)	168	Área Final (mm2)	59,5		
Carga Máxima (Kg)	7945	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		463,93	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		333,34	
Especificaciones Probeta 14					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	69	% Elongación	38
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	60,248
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	64		
Carga Máxima (Kg)	7450	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		453,94	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		310,84	
Especificaciones Probeta 15					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	67	% Elongación	34
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	15		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	62,73
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	60		
Carga Máxima (Kg)	7070	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		430,79	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		310,92	

Fuente: Autores.

Figura 45. Curva Esfuerzo – Deformación



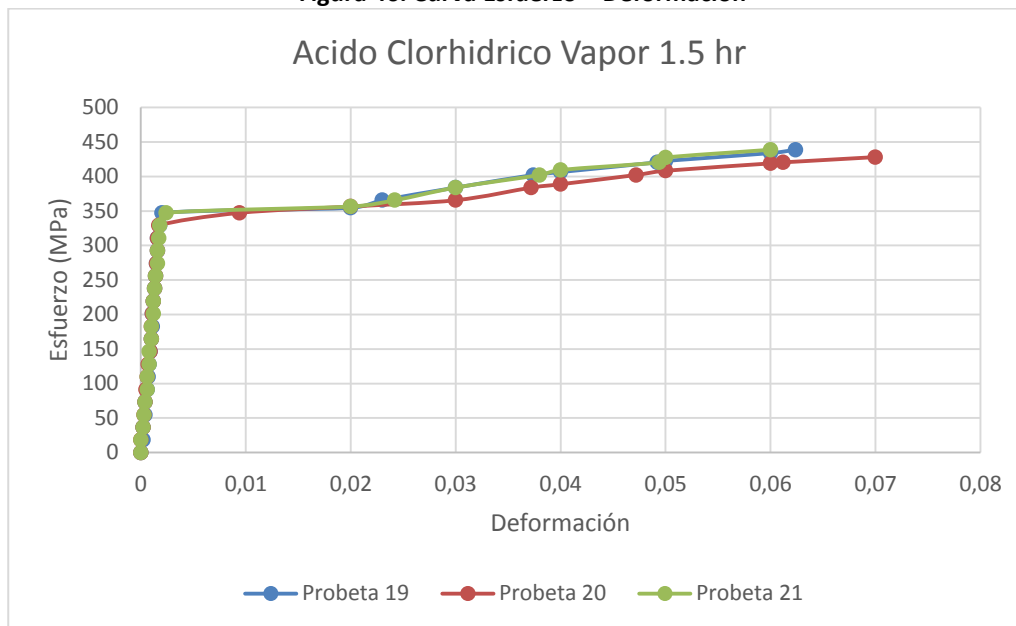
Fuente: Autores.

Tabla 15. Especificaciones Probetas

Especificaciones Probeta 16					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	66	% Elongación	32
Ancho (mm)	22	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	58,44
Área (mm2)	154	Área Final (mm2)	64		
Carga Máxima (Kg)	7250	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		461,83	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		324,88	
Especificaciones Probeta 17					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	62	% Elongación	24
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3,5	% Reducción de área	65,22
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	56		
Carga Máxima (Kg)	7825	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		476,79	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		329,20	
Especificaciones Probeta 18					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	64	% Elongación	28
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	14		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	65,22
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	56		
Carga Máxima (Kg)	7565	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		460,95	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		310,94	

Fuente: Autores.

Figura 46. Curva Esfuerzo – Deformación



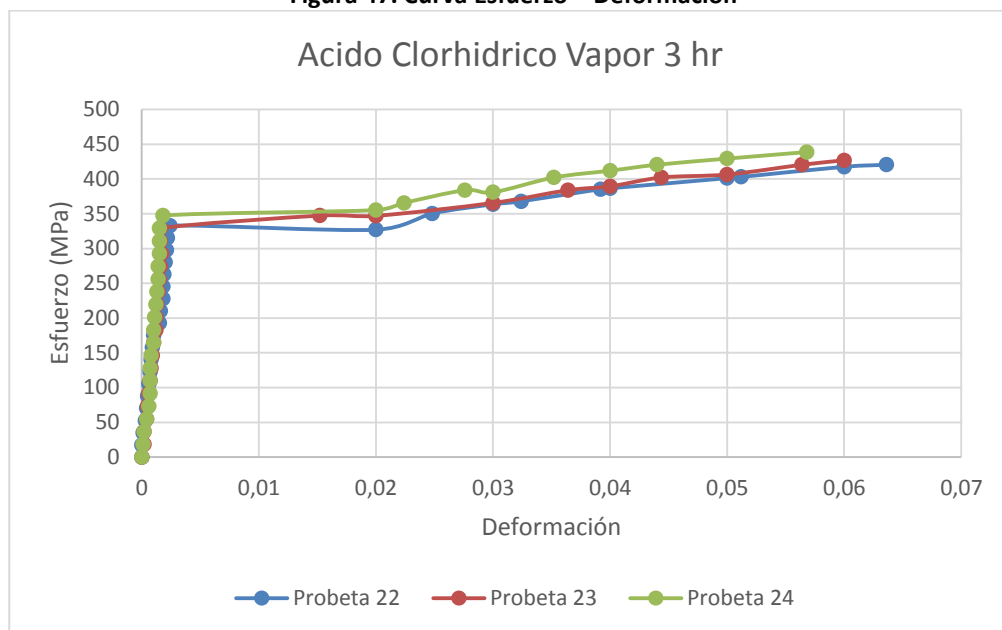
Fuente: Autores.

Tabla 16. Especificaciones Probetas

Especificaciones Probeta 19					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	62	% Elongación	24
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3,5	% Reducción de área	65,22
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	56		
Carga Máxima (Kg)	7675	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		467,65	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		347,31	
Especificaciones Probeta 20					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	62	% Elongación	24
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	19		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	6	% Reducción de área	29,19
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	114		
Carga Máxima (Kg)	7340	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		447,24	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		329,74	
Especificaciones Probeta 21					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	69	% Elongación	38
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3	% Reducción de área	70,19
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	48		
Carga Máxima (Kg)	7765	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		473,13	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		335,12	

Fuente: Autores.

Figura 47. Curva Esfuerzo – Deformación



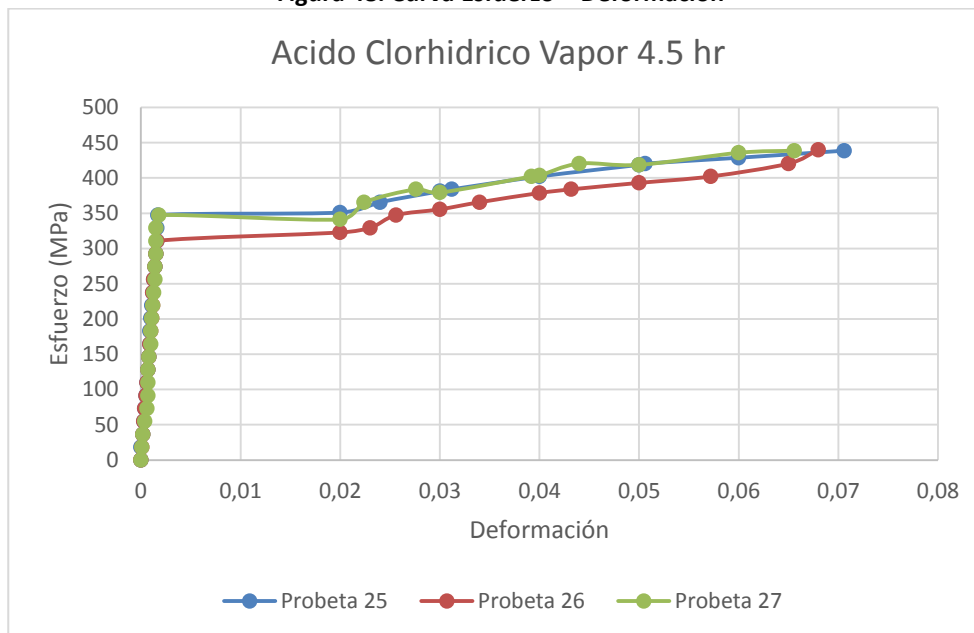
Fuente: Autores.

Tabla 17. Especificaciones Probetas

Especificaciones Probeta 22					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	68	% Elongación	36
Ancho (mm)	24	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	61,90
Área (mm2)	168	Área Final (mm2)	64		
Carga Máxima (Kg)	7630	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		445,54	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		280,29	
Especificaciones Probeta 23					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	61	% Elongación	22
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	15		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	62,73
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	60		
Carga Máxima (Kg)	7565	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		460,95	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		329,56	
Especificaciones Probeta 24					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	65	% Elongación	30
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	18		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	5	% Reducción de área	44,10
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	90		
Carga Máxima (Kg)	7580	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		461,86	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		347,39	

Fuente: Autores.

Figura 48. Curva Esfuerzo – Deformación



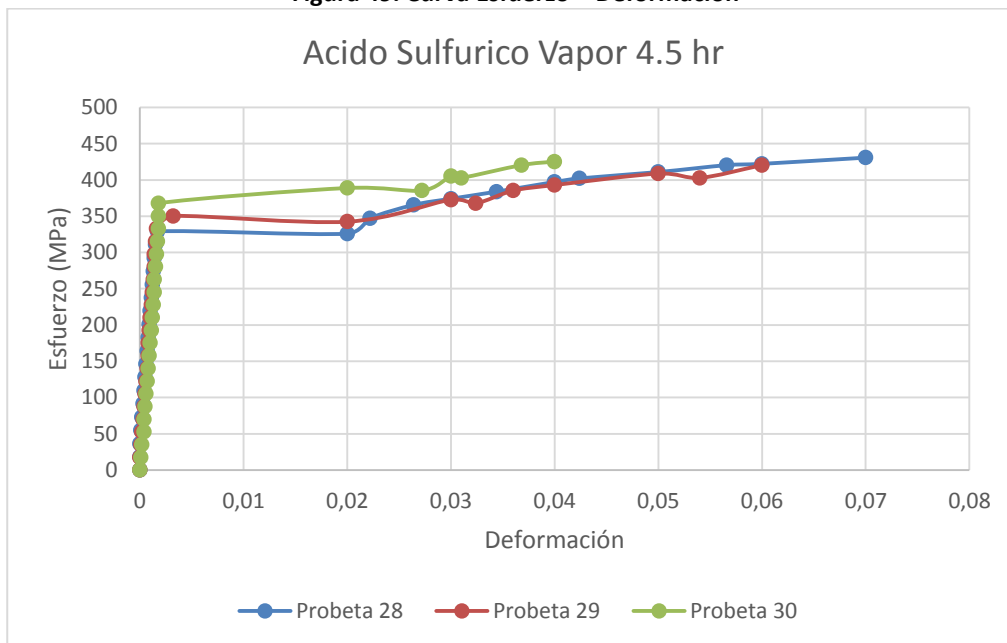
Fuente: Autores.

Tabla 18. Especificaciones Probetas

Especificaciones Probeta 25					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	67	% Elongación	34
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3,5	% Reducción de área	65,22
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	56		
Carga Máxima (Kg)	7575	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		461,56	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		347,36	
Especificaciones Probeta 26					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	68	% Elongación	36
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	15		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	62,73
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	60		
Carga Máxima (Kg)	7540	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		459,42	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		311,01	
Especificaciones Probeta 27					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	66	% Elongación	32
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	18		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	55,28
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	72		
Carga Máxima (Kg)	7630	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		464,91	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		347,24	

Fuente: Autores.

Figura 49. Curva Esfuerzo – Deformación



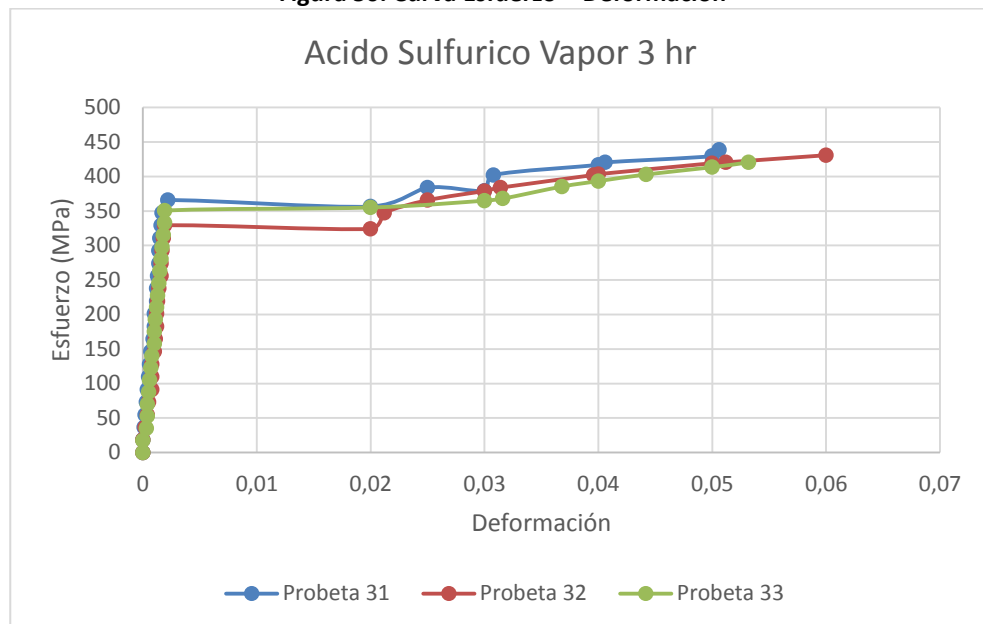
Fuente: Autores.

Tabla 19. Especificaciones Probetas

Especificaciones Probeta 28					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	66	% Elongación	32
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	15		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	62,73
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	60		
Carga Máxima (Kg)	7420	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		452,11	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		328,97	
Especificaciones Probeta 29					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	67	% Elongación	34
Ancho (mm)	24	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3,5	% Reducción de área	66,67
Área (mm2)	168	Área Final (mm2)	56		
Carga Máxima (Kg)	7760	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		453,13	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		337,21	
Especificaciones Probeta 30					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	65	% Elongación	30
Ancho (mm)	24	Ancho final (mm)	17		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	6	% Reducción de área	39,29
Área (mm2)	168	Área Final (mm2)	102		
Carga Máxima (Kg)	8305	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		484,95	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		368,10	

Fuente: Autores.

Figura 50. Curva Esfuerzo – Deformación



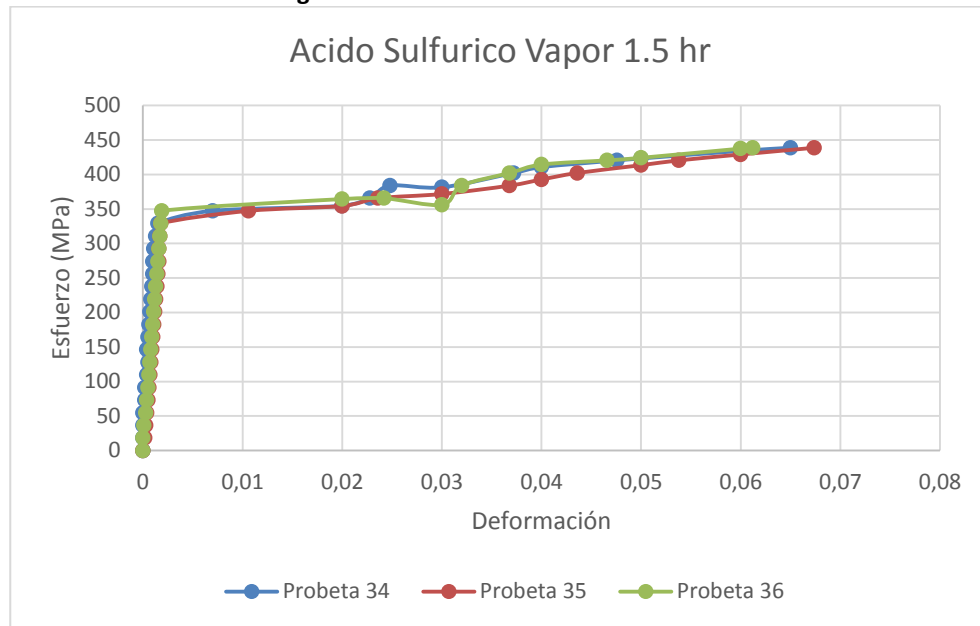
Fuente: Autores.

Tabla 20. Especificaciones Probetas

Especificaciones Probeta 31					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	68	% Elongación	36
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3,5	% Reducción de área	65,22
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	56		
Carga Máxima (Kg)	7640	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		465,52	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		358,27	
Especificaciones Probeta 32					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	65	% Elongación	30
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	3	% Reducción de área	70,19
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	48		
Carga Máxima (Kg)	7385	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		449,98	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		329,003	
Especificaciones Probeta 33					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	67	% Elongación	34
Ancho (mm)	24	Ancho final (mm)	17		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	5	% Reducción de área	49,40
Área (mm2)	168	Área Final (mm2)	85		
Carga Máxima (Kg)	8055	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		470,35	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		350,37	

Fuente: Autores.

Figura 51. Curva Esfuerzo – Deformación



Fuente: Autores.

Tabla 21. Especificaciones Probetas

Especificaciones Probeta 34					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	67	% Elongación	34
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	60,25
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	64		
Carga Máxima (Kg)	7650	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		466,13	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		330,69	
Especificaciones Probeta 35					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	63	% Elongación	26
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	15		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	6	% Reducción de área	44,10
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	90		
Carga Máxima (Kg)	7670	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		467,35	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		329,44	
Especificaciones Probeta 36					
Largo (mm)	50	Largo final (mm)	67	% Elongación	34
Ancho (mm)	23	Ancho final (mm)	16		
Espesor (mm)	7	Espesor final (mm)	4	% Reducción de área	60,25
Área (mm2)	161	Área Final (mm2)	64		
Carga Máxima (Kg)	7775	Esfuerzo Ultimo (Mpa)		473,74	
Deformación	0,2%	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)		347,40	

Fuente: Autores.

Según los resultados obtenidos en las curvas esfuerzo – deformación en las figuras de la 40 a la 51, y las tablas con las especificaciones de cada probeta respectivamente, comparamos valores de esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, porcentaje de elongación y curva esfuerzo – deformación evidenciada en la figura 16, con respecto a valores del acero ASTM A53 Gr. B referenciados en la tabla 2.

En las figuras 40, 41, 42, 49, 50 y 51 se evidencia la condición del acero ASTM A53 Gr. B al estar expuesto a ácido sulfúrico en estado líquido y vapor a tiempos de exposición ya enunciados, los datos relacionados en las tablas 10, 11, 12, 19, 20 y 21, haciendo referencia a la suposición de endurecimiento del material debido al fenómeno de corrosión debido a los precipitados formados por la acción de la corrosión de los ácidos en la zona superficial de la probeta que se encuentra en contacto con dicho ataque, se evidencia un posible aumento en las propiedades mecánicas: Esfuerzo Ultimo, Esfuerzo de Fluencia y porcentaje de elongación, además de no representar un cambio significativo en la curva esfuerzo – deformación comparada con la curva del material sin estar expuesto al ataque corrosivo.

En las figuras 43, 44, 45, 46, 47 y 48 se evidencia la condición del acero ASTM A53 Gr. B al estar expuesto a ácido clorhídrico en estado líquido y vapor a tiempos de exposición ya enunciados, los datos relacionados en las tablas 13, 14, 15, 16, 17 y 18, haciendo referencia a la suposición de endurecimiento del material debido al fenómeno de corrosión debido a los precipitados formados por la acción de la corrosión de los ácidos en la zona superficial de la probeta que se encuentra en contacto con dicho ataque, se evidencia un posible aumento en las propiedades mecánicas: Esfuerzo Ultimo, Esfuerzo de Fluencia y porcentaje de elongación, además de no representar un cambio significativo en la curva esfuerzo – deformación comparada con la curva del material sin estar expuesto al ataque corrosivo; comparado con los valores presentados con la exposición a Ácido Sulfúrico, el Esfuerzo de Fluencia presento una mínima variación debido a que fue mayor la susceptibilidad del acero al fenómeno de corrosión provocada por el ácido clorhídrico, posiblemente una mayor corrosión hacia la zona media de la probeta, el esfuerzo último no mostro una variación considerable.

13. CONCLUSIONES

Las conclusiones de los resultados obtenidos de las pruebas sometidas al acero ASTM A53 Gr. B a fluidos corrosivos para aplicaciones en energía geotérmica resultaron las siguientes conclusiones:

El acero ASTM A53 Gr. B presenta una tendencia a perder material al aumentar el tiempo de exposición en el medio corrosivo al que estuvo expuesto, en este caso Ácido Sulfúrico y Ácido clorhídrico. Demostrando mayor agresividad el ácido clorhídrico en ambos estados, evidenciando una pérdida de masa y una relación de corrosión más significativa que el ataque con ácido sulfúrico; condición que se puede verificar en las tablas 7, 8 y en la figura 17, lo cual indica que el acero es más susceptible al ataque con este ácido.

El estado del fluido corrosivo que genera más susceptibilidad al acero ASTM A53 Gr. B se presentó en el ácido clorhídrico en estado líquido, presentando pérdidas de aproximadamente el 1% durante 4,5 horas.

Se determinó que el pitting en los bordes del acero ASTM A53 Gr. B disminuye al aumentar el tiempo de exposición al fluido corrosivo, por lo tanto inicia la presencia de inclusiones en el material por efecto del ácido, produciendo adelgazamiento del material y susceptibilidad a la fractura.

Debido a la corrosión que genera el fluido al acero ASTM A53 Gr. B, este tiende a endurecerse superficialmente, por lo tanto a perder material debido al contacto directo y constante con el ácido sulfúrico y clorhídrico presentes en los fluidos geotérmicos, generando un posible aumento en la tenacidad de este y aumento en su dureza, condición no favorable para este tipo de aplicaciones.

De igual forma el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia se ven afectados debido al endurecimiento del material superficialmente, evidenciando que la zona media no se ve considerablemente afectada. Por tanto, las propiedades mecánicas del acero ASTM A53 Gr. B aumentaron debido al contacto con los fluidos corrosivos, demostrando que el ácido clorhídrico posiblemente alcanza la zona media del material generando que el esfuerzo de fluencia fuera menor que el presente en el ácido sulfúrico.

Se demostró que la tendencia del acero ASTM A-53 Gr. B al ser expuesto pierde material y se endurece superficialmente en relación a este tiempo de exposición, por lo tanto se recomienda realizar las exposiciones a estos fluidos durante un tiempo mayor para verificar la afirmación anterior.

14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética –UPME “Plan de expansión de referencia generación – transmisión 2013-2027” Colombia.
- [2] Israel Saucedo-Meza, Carlos A. Miranda-Herrera, Guillermo Cine-Páez, Orlando Susarrey-Huerta, Antonio Corona-Guzmán “Análisis de tuberías de acero A-35 gr. B expuesto a fluidos geotérmicos” Científica, Vol.15 Núm. 1, pp. 11-16, enero-marzo 2011
- [3] Isagem, BID “Notas para la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia” Colombia. 2012
- [4] Carlos A. Miranda Herrera, Ismael Canchola Félix, Joaquín Raygoza Flores y Othón Mora Pérez “Corrosión en tuberías de línea y de revestimiento de pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC”. Geotermia, Vol. 22
- [5] Adrián Cortes M, Martha P. Guerrero M, Dora Martínez D. “Evaluación de la resistencia a la corrosión de aleaciones para oleoductos”, Pedro de Alba S/N, CD. Universitaria, San Nicolás, N.L.; 66450 México. Marzo 2005, Vol. 8.
- [6] Mary H. Dickson. Mario Fanelli “¿Qué es la energía geotérmica?” Istituto di geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia.
- [7] Disponible en la página web: <http://twenergy.com/energia-geotermica/que-es-la-energia-geotermica-108>
- [8] Alfredo Lahsen Azar “La energía geotérmica: posibilidades de desarrollo en Chile”. Departamento de Geología, Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- [9] Victor M. Arellano, Eduardo I. Rodriguez, Alfonso Garcia. “La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura”. Boletín IIE. Tendencias tecnológicas
- [10] Mary H Dickson, Mario Fanelli “¿Que es la Geotermia?” Istituto di geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia
- [11] http://www.infoacero.cl/acero/que_es.htm
- [12] Edgar Espejo Arias. “Tipos de corrosión y de superficies corroídas en metales”.
- [13] “Corrosion Engineering, Principles and practice” Pierre R. Roberge
- [14] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/villela_e_ij/capitulo5.pdf
- [15] <http://copernico.escuelaing.edu.co/lpinilla/www/protocolos/MATE/tension.pdf>
- [16] http://ocw.um.es/gat/contenidos/ubero/microscopia/material_clase/presentacion_2.pdf
- [17] “Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials” ASTM E-394-99
- [18] Endesa S.A. 2011 [en línea], Disponible en la página web: <http://www.endesa.com/es/saladeprensa/glosario/home?letra=E>
- [19, 20, 21, 22, 23] Llopis, G y compañía. “Guía de la energía geotérmica”, [pdf]. Disponible en la página web: http://www.uclm.es/cr/EUP-ALMADEN/aaa-eupa/boletin_informativo/pdf/boletines/17/9.pdf
- [24] Sistema Estatal de Información del Agua. “Pozos”, [en línea]. 17 de Mayo de 2012. Dirección de la página web:

<http://seia.guanajuato.gob.mx/seianuevo/seiawordpress/?p=804>

[25] “Corrosión de Aceros”, [pdf]. Disponible en la página web: http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/josem/static/CORROSION.pdf

[26] “Propiedades de los Materiales”, [en línea]. 15 de Diciembre de 2012. Disponible en la página web: <http://www.apuntesdigitales.info/propiedades-de-los-materiales/>

[27] “El pH”, [en línea]. Disponible en la página web: <http://marty80.wikispaces.com/El+pH>

[28] Lista de Palabras. “Salmuera”, [en línea]. Disponible en la página web: http://listadepalabras.es/palabra_significado.php?woordid=SALMUERA

[29] Scribd. “Aceros”, [en línea]. Disponible en la página web: <http://es.scribd.com/doc/105046968/aceros>

[30] “Soluciones de Electrolitos”, [en línea]. Disponible en la página web: <http://soluciones-quimicas.wikispaces.com/Soluciones+De+Electrolitos>

[31] Manual de Laboratorio, Termodinámica. “Introducción a la Termodinámica”, [en línea]. 28 de Noviembre de 2012. Disponible en la página web: <http://termouam.wordpress.com/2012/11/28/introduccion-a-la-termodinamica/>

[32] Scribd. “Grieta”, [en línea]. Disponible en la página web: <http://es.scribd.com/doc/77770699/Grieta>

[33] AMCO TVC. “Tubería”, [en línea]. 25 de Junio de 2013. Disponible en la página web: http://www.amcotvc.com.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=46:bespin&catid=34:demo-category

[34] Wikipedia, La enciclopedia libre. “Fluido”, [en línea]. 20 de Junio de 2013. Disponible en la página web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Fluido>

[35] “El cambio químico”, [en línea]. Disponible en la página web: <http://elkmbioquimico.wikispaces.com/>

[36] Equipos y Laboratorio de Colombia. “Cambios de estado de la materia”, [en línea]. Disponible en la página web: http://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=2795

[37] “Preparation, installation, analysis and interpretation of corrosion coupons in oilfield operation” NACE RP0775-2005

[38] Adrián Cortes M, Martha P. Guerrero M, Dora Martínez D. “Evaluación de la resistencia a la corrosión de aleaciones para oleoductos”, Pedro de Alba S/N, CD. Universitaria, San Nicolás, N.L.; 66450 México. Marzo 2005, Vol. 8.

[39] ASM Handbook “Heat Teating” Vol.4. ASM International

INFOGRAFIA

- (*1) http://www.cordes.com.ar/index.php?modulo=mater&accion=sitio_ver&idmater=158&page_ANTE=1
- (*2) http://www.vigordrilling.com/pro_content.aspx?bh=156
- (*3) <http://www.sunnysteel.com/blog/index.php/tag/api-5ct-q125/>
- (*4) <http://www.ferreceptsa.com.mx/grados-acero-sae-1018.php>
- (*5) http://www.ehowenespanol.com/propiedades-del-acero-4140-ht-info_92988/
- (*6) http://www.ehowenespanol.com/acero-a36-sobre_170749/